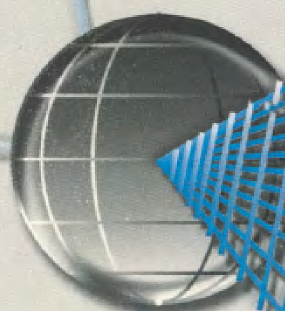


IAEA

International Atomic Energy Agency



Kiirgus, inimesed ja keskkond



KIIRGUS, INIMESED JA KESKKOND

... ülevaade ioniseerivast kiirgusest,
selle mõjudest,
kasutamisest ja ohutu kasutamise
tagamise meetmetest



Raamatu tõlkimist ja avaldamist korraldas Kiirguskeskus Rahvusvahelise Aatomienergia-agentuuri loal ja Keskkonnainvesteeringute Keskuse toetusel

Tõlkija Ruth Hint

Toimetajad Kristel Kõiv Merle Lust Tõnu Viik

Väljaandja Mixi Kirjastus OÜ

Trükitud Tallinna Raamatutrükikojas

ISBN-13: 9985-9704-1-1

ISBN-10: 978-9985-9704-1-6

SISUKORD

Peatükk 1 Sissejuhatus

Kiirgus on igapäevane tõsiasi. Me elame maailmas, kus kiirgus esineb kõikjal looduses. Päikesel toimuvates tuumareaktsioonides tekkinud valgus ja soojus on meie eluks hädavajalikud. Radioaktiivseid materjale leidub kõikjal keskkonnas ning meie keha sisaldab selliseid radioaktiivseid materjale nagu süsinik-14, kaalium-40 ja poloonium-210. Kogu elu Maal on arenenud selle kiirguse mõju all.

Alates röntgenkiirguse avastamisest üle 100 aasta tagasi oleme leidnud võimalusi kiirguse ja radioaktiivsete materjalide tehislikuks tekitamiseks ja tootmiseks. Esimest korda kasutati röntgenkiirgust meditsiinilises diagnostikas vähem kui kuus kuud pärast selle avastamist 1895. aastal. Niisiis mõisteti kiirguse kasulikkust väga vara, sellega koos selgus aga ka kiirguse võimalik ohtlikkus arstide ja kirurgide jaoks, kes 1900. aastate alguses said teadmatusest kiirguse üledoose.

Ainele avaldatud mõju järgi on kiirgust võimalik liigitada ioniseerivaks ja mitteioniseerivaks. *Ioniseerivaks* kiirguseks on kosmiline kiirgus, röntgenkiirgus ja kiirgus radioaktiivsetest materjalidest. *Mitteioniseerivaks* kiirguseks on ultraviolettvalgus, soojuskiirgus, raadiolained ja mikrolained.

Käesolev ülevaade käsitleb ioniseerivat kiirgust, mida siin lihtsuse huvides nimetatakse lühidalt kiirguseks. Ülevaate on koostanud Rahvusvaheline Aatomienergiaagentuur (IAEA) koostöös Ühendkuningriigi Riikliku Kiirguskaitseametiga ja selle eesmärgiks on ioniseeriva kiirguse, selle mõjude ja kasutuse ning ohutu kasutamise meetmete üldine tutvustamine.

IAEA kui ÜRO tuumateaduse ja selle rahuotstarbelise rakendamise agentuur pakub väga laialdasi ekspertteadmisi ja programme, et edendada maailmas kiirguse ohutut kasutamist. IAEA põhikirjas on sätestatud vastutus ohutusstandardite arendamise eest, mis on rakendatavad väga erinevate kiirgusseadmete juures. IAEA aitab oma liikmesriikides neid standardeid rakendada tehniliste koostööprojektide kaudu nagu koolitused ja nõustamisteenused. Ta edendab ka infovahetust konverentside ja käesoleva väljaande laadsete infotrükiste abil.

Kasud ja riskid

Põhjendatud otsuse langetamiseks kiirguse kasutamise kohta on vajalik välja selgitada tegevusega seotud kasud ja riskid ning viia kõik riskid nii väikeseks kui võimalik. Ioniseeriva kiirguse ja radioaktiivsete materjalide avastamine on viinud märkimisväärse arenguni meditsiinilises diagnostikas ja ravis ning neid kasutatakse laialdaselt tööstuses, põllumajanduses ja teaduses. Paraku võib see inimesele ka ohtlikuks osutuda ja mittevajaliku või liigse kiirguse eest tuleb elanikkonda kaitsta. Tingimustes, mis alluvad meie kontrollile, peame hoidma inimest kiirguse mõju alla seadvate tegevuste kasud ja riskid väga hoolikalt tasakaalus.

Mõned ioniseeriva kiirguse kasutusvõimalused

Meditsiiniline diagnoosimine ja ravi

Tuumaenergia

Tööstuslik radiograafia

Meditsiinitarvete steriliseerimine

Toiduainete kiiritamine

Satelliitide toiteallikad

Teaduslik ja meditsiiniline uurimistöö

Üldsuse hirmud

Suurim mure seoses kiirgusega on võimalike pahaloomuliste kasvajate põhjustamine inimestele, kes on kiirgusega kokku puutunud ning pärilikud kahjustused järgmistes põlvkondades. Mõju ilmnemine oleneb kiirguse hulgast, mida inimene saab kas looduslikust või kunstlikust allikast. Et viimaste aastakümnete jooksul on hakatud ioniseeriva kiirguse mõjusid paremini mõistma, siis on välja arendatud kiirguskaitse süsteem inimeste kaitsmiseks kiirgusallikate mõju eest. Ent üldsuse hirm ei vähene.

Kiirgus on üks paljudest hirmsa haiguse vähi põhjustajatest. Meie meeled ei suuda kiirgust tajuda, mis muudab selle nähtamatu ohu veelgi salalikumaks. Üldsuse rahutust suurendavad mälestused – ja mõnel juhul ka jätkuvalt avalduvad mõjud – tuumaelektrijaamade ja teiste seadmetega toimunud õnnetuste tagajärgedest ning üldine hoiak seostada igasugune kiirgus „tuumaasjadega”, sealhulgas tuumarelvadega.

Teiseks põhjuseks, miks kiirgusega seotud teemad suurendavad üldsuse valvsust, võib olla usaldusväärse ja kättesaadava teabe puudus ja sellest tulenevad väärarusaamad. Selle väljaande eesmärk on anda teavet neile, kes pole eksperdid. Järgmistes peatükkides kirjeldame kiirgusallikaid, kõigi ioniseeriva kiirguse liikide mõjusid ning selgitame kiirguskaitse põhimõtteid ja praktikat.



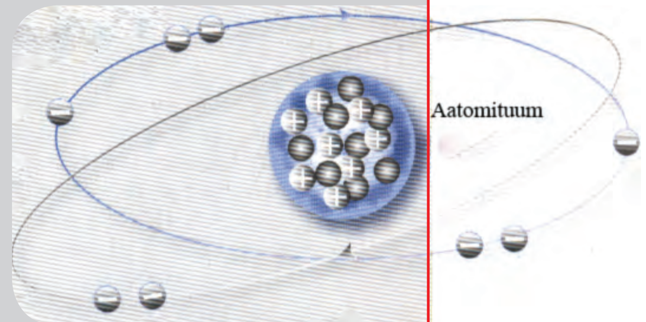
Peatükk 2 Aatomid ja kiirgus

Aine ehitus

Kõik ained, mis esinevad meid ümbritsevas maailmas, koosnevad aatomitest. Need on ka selliste *elementide* nagu vesinik, süsinik, hapnik, raud ja plii esmased ehitusühikud. Iga aatom koosneb tillukesest tsentraalselt asetsevast positiivse laenguga tuumast ja teatud arvust *elektronidest*. Elektronid kannavad negatiivset laengut ja moodustavad tuuma ümber liikuva muutuvate piiridega pilve, mida kutsutakse ka kihiks. Tavaliselt on tuum 10 000 korda väiksem kui elektronpilv ja elektronid ise veel väiksemad. See tähendab, et aatom on suuremas osas tühi ja teda on raske kujutada teisiti kui ainult visandlikult.

Vesiniku aatomi planetaarne esitus: tuumas on 8 prootonit ja 8 neutronit ning tema ümber orbitaalidel on 8 elektroni

Aatomituum sisaldab *prootoneid*, mis kannavad elektroni negatiivse laenguga võrdset positiivset laengut, ja *neutronid*, millel pole üldse laengut. Prootonite ja neutronite struktuuri ja sidet tuumaga pole siinkohal vajalik põhjalikumalt kirjeldada. Iga aatom sisaldab võrdse arvu elektrone ja prootoneid ning on seetõttu elektriliselt neutraalne. Sama või erinevate elementide aatomid võivad ühineda ja moodustada suuremaid laenguta kogumeid, mida kutsutakse *molekulideks*. Näiteks kaks hapniku aatomit moodustavad ühe hapniku molekuli ja kaks vesiniku aatomit moodustavad koos ühe hapniku aatomiga ühe vee molekuli.



Prooton
Neutron
Elektron

Tuum = prootonid + neutronid

Elektronide arv aatomis – ja vastavalt prootonite arv tuumas, mida nimetatakse *aatomnumber* – annab elemendile tema unikaalsed omadused. Näiteks süsiniku aatomnumber on 6, samas kui plii aatomnumber on 82. Põhjusel, et prootonitel ja neutronitel on võrdne mass ja nad on palju raskemad kui elektronid, koondub enamus aatomi massist tuuma. Prootonite ning neutronite koguarvu nimetatakse *massiarvuks*.

Elektriliselt neutraalses aatomis on elektronide arv võrdne prootonite arvuga ja seetõttu saame aatomi tüüpe määrata neis sisalduvate prootonite ja elektronide arvu järgi. Et aga prootonite arv on igale elemendile ainuomane, võime lihtsalt kasutada elemendi nime koos massiarvuga, et määrata iga aatomi tüüpi ehk *nukliidi*. Niisiis on süsinik-12 kuue prootoni ja kuue neutroniga nukliid. Võrdluseks plii-208 on 82 prootoni ja 126 neutroniga nukliid.

Sama elemendi nukliide, millel on ühesugune prootonite arv, kuid erinev neutronite arv, kutsutakse selle elemendi isotoopideks. Näiteks vesinikul on kolm isotoopi: vesinik-1 (tavaline vesinik, mille tuumas on ainult üks prooton), vesinik-2, mida kutsutakse deuteeriumiks (üks prooton ja üks neutron) ja vesinik-3, mida kutsutakse triitiumiks (üks prooton ja kaks neutronit). Raual on kümme isotoopi vahemikus raud- 52 kuni raud-61, igaühe tuumas on 26 prootonit, mis on iseloomulikud elemendile, kuid vastavalt 26 kuni 35 neutronit.



Vesinik Deuteerium Triitium

Vesiniku isotoobid

Tuum = prootonid + neutronid

Radioaktiivsus ja kiirgus

Ehkki paljud nukliidid on stabiilsed, siis enamik seda ei ole. Stabiilsus määratakse peamiselt nukliidis sisalduvate neutronite ja prootonite arvu vahelise tasakaalu järgi. Väiksemates stabiilsetes tuumades on see arv tavaliselt võrdne, suuremates stabiilsetes tuumades on neutroneid veidi rohkem kui prootoneid. Neutronite suure ülekaaluga tuumad püüavad saavutada stabiilsemat struktuuri, muundades neutroneid prootoniteks. Selles beetalõhustumiseks nimetatud protsessis vabaneb elektriliselt negatiivselt laetud elektron, mida nimetatakse *beetaosakeseks*. Liiga suure prootonite arvuga tuum muundab aga liigsed prootonid neutroniteks ning selle tagajärje kaotavad tuumad positiivse laengu, vabastades *positrone*, mis kujutavad endast positiivselt laetud elektrone.



y – aasta, d – päev
h – tund, s – sekund
α-decay – α lagunemine
β-decay – β lagunemine

Radionukliidide lõhustumine: erinevat liiki kiirgus ja poolestusajad

Sellised muundumised annavad tuumale tihti liigse energia, mida tuum vabastab *gammakiirtena* – kõrge energiaga *footonitena*, mis on ilma massi või laenguta diskreetsed energiaosakesed. Tuuma iseeneslikku muundumist kutsutakse *radioaktiivsuseks* ja liigne energia, mida tuum vabastab, on (ioniseeriva) kiirguse vorm. Muundumise akti kutsutakse lõhustumiseks ja muutuvat ning kiirgust eraldavat nukliidi nimetatakse *radionukliidiks*.

Mõnede raskete tuumade lõhustumisel moodustub *alfaosake*, mis koosneb kahest prootonist ja kahest neutronist. Heeliumi tuumaga identne alfaosake on palju raskem kui beetaosake ning kannab kahte ühikut positiivset laengut.

Looduslikud radionukliidid

Looduses leidub paljusid radionukliide. Näiteks süsinik esineb peamiselt täielikult stabiilse süsinik-12 vormis, millel on kuus prootonit ja kuus neutronit. Kokkupuude kosmiliste kiirtega atmosfääris võib tekitada radionukliidi süsinik-14, millel on kuus prootonit ja kaheksa neutronit. Liigsete neutronitega süsinik-14 lõhustub, muutes neutroni prootoniks ja vabastades beetaosakese. Nii saab nukliidist stabiilne lämmastik-14, millel on seitse prootonit ja seitse neutronit. Materjalide vanuse määramiseks kasutatava radioaktiivse süsiniku meetodi aluseks on selle lagunemise mõõtmine süsinikku sisaldavates materjalides.
Teised looduslikud radionukliidid moodustuvad uraani ja tooriumi lagunemisridades. Kõik need read lõpevad stabiilse plii nukliidiga, kuid läbivad ka teiste tuntud elementide radionukliide. Joonis kirjeldab uraan-238 lagunemisrida, mis lõpeb stabiilse elemendiga plii-206, kuid mille üheks vaheastmeks on näiteks radionukliid radoon-222, millel on kiirguskaitse jaoks eriline tähendus.

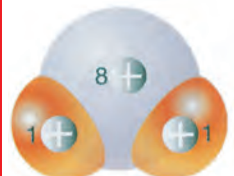
Radionukliidid	*Mittestabiilsed nukliidid*
Radioaktiivsus	*Kiirguse eraldumine*
Kiirguse liigid	*Alfa-, beeta-, gamma-, neutron- ja röntgenkiirgus*
Aktiivsus	*Radionukliidi lagunemiskiirus*
Poolestusaeg	*Aeg, mille jooksul väheneb aktiivsus poole võrra*

Kiirgusenergia

Erinevat tüüpi kiirguse – alfa- ja beetaosakesed ning gammakiirgus – energia tähistamise ühikuks on elektronvolt (eV). Sageli kasutatakse ühiku kordseid väärtusi, nagu miljon või 106 elektronvolti, sümbol MeV. Näiteks poloonium-214 eraldatud alfaosakeste energia on umbes 7,7 MeV. Plii-214 beetaosakeste, mis moodustuvad ka uraan-238 lagunemisreas, maksimumenergia on 1,0 MeV ja selle käigus vabanenud gammakiire energia on kuni 0,35 MeV.

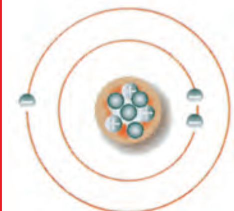
Viimaste aastakümnete jooksul on looduslikest elementidest kunstlikult tekitatud mitusada radioaktiivset isotoopi (radioisotoopi), sealhulgas näiteks strontsium-90, tseesium-137 ja jood-131. Mitmeid uusi radioaktiivseid elemente on toodetud suurtes hulkades, näiteks promeetiumi ja plutooniumi, ehkki viimase jälgi leidub ka looduslikus uraanimaagis.

Molekul =
ühendatud aatomid



Vee molekul

Aatom =
tuum + elektronid


Liitium

Nukliid =
aatomi tüübid



Hapniku aatom

Prooton
Neutron
Elektron



Marie Curie (1867–1934)

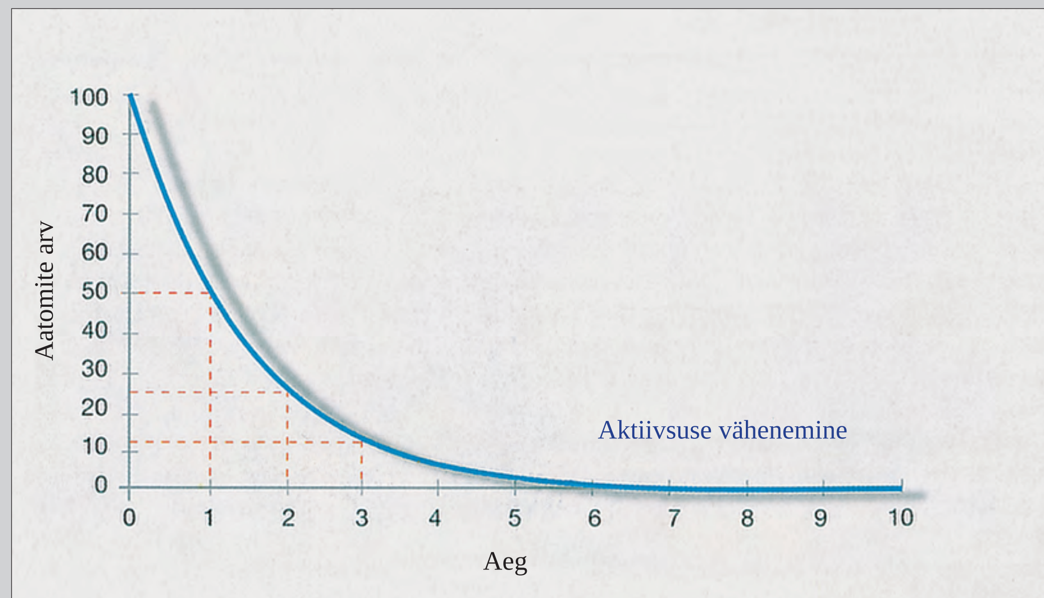
Iseeneslike muundumiste toimumise määra antud hulgas radioaktiivses materjalis nimetatakse aktiivsuseks. Aktiivsust väljendatakse ühikutes, mida nimetatakse bekerelliks (sümbol Bq). Üks Bq võrdub ühe muundumisega sekundis. Bekerell on saanud oma nime prantsuse füüsiku Henri Becquereli järgi. Ühik on väga väike ja seetõttu kasutatakse bekerelli tihti kordsetena, näiteks megabekerell ehk MBq, mis on 1 miljon bekerelli. Ühe grammi raadium-226 aktiivsus on näiteks ligikaudu 37 000 MBq: ta eraldab umbes 37 000 miljonit alfaosakest igas sekundis (varem kasutatud aktiivsuse ühikut kürii – mis sai nime poola päritolu prantsuse teadlase Marie Curie järgi – defineeriti kui ühe grammi raadiumi aktiivsust).



Henri Becquerel (1852–1908)

Poolestusaeg

Aega, mis kulub radionukliidil poole kaotamiseks oma aktiivsuse algväärtusest, kutsutakse poolestusajaks (sümbol $t_{½}$). Teisiti öeldes, see on aeg, mille jooksul pooled proovi nukliidid lagunevad. Igal radionukliidil on ainuomane poolestusaeg, mis võib ulatuda sekundi murdosast miljardite aastateni. Jood-131 puhul on see 8 päeva, tseesium-137 30 aastat, süsinik-14 5730 aastat, plutoonium-239 24 000 aastat ja uraan-238 4470 miljonit aastat. Järjestikusel poolestumisel kahaneb radionukliidi aktiivsus ½, ¼, ⅛-ni jne oma algsest väärtusest. See tähendab, et on võimalik prognoosida järelejäänud aktiivsust. Kui radionukliidi kogus väheneb, väheneb proportsionaalselt ka eralduv kiirgus.



Kiirguse liigid

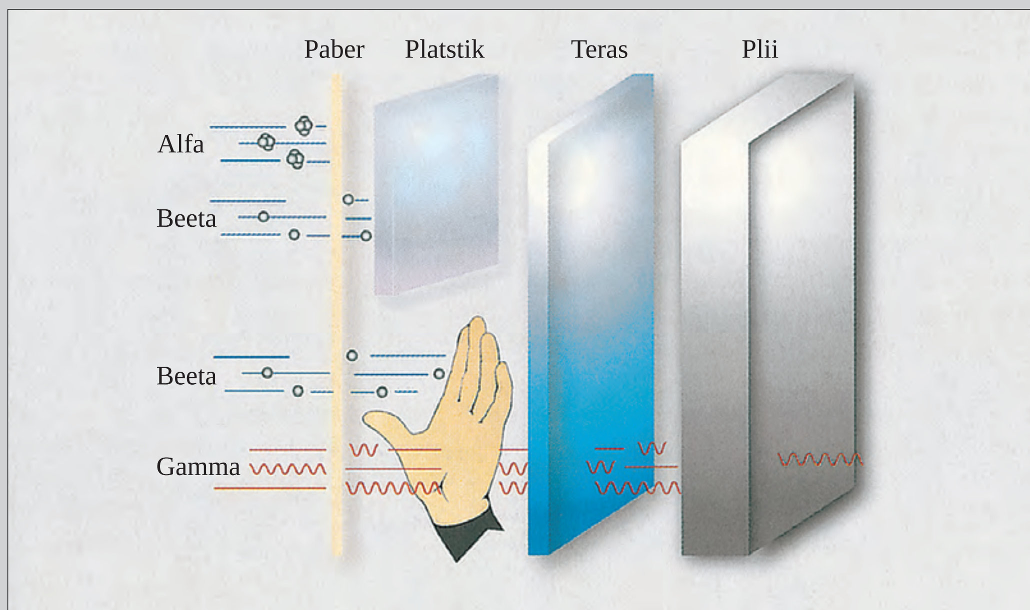
Enamus levinud kiirguse liigid on pärit radioaktiivsetest materjalidest, kuid teatud liiki kiirgusi tekitatakse muul viisil. Kõige tuntumaks näiteks on röntgenkiired, mida tavaliselt tekitatakse elektronkiirega metallist sihtmärki (tavaliselt volframi) tulistades. Metalli aatomite elektronid neelavad elektronkiire energia – teaduskeeles öeldes metalli aatomid ergastuvad ning siis „lõõgastudes“ vabastavad energia röntgenkiirtena. Kiirgus pärineb niisiis metalli aatomitest, kuid erinevalt radioaktiivsest kiirgusest ei vabane ta tuumast. Selline tekkimisviis tähendab ka, et röntgenkiirgusega ei kaasne poolestumise protsessi. Kui elektronkiir välja lülitatakse, kaovad ka röntgenkiired.

Alfakiirguse

(α) moodustavad positiivse laenguga heeliumi tuumad, mis eralduvad suuremast ebastabiilsest tuumast. Alfa-osake on suhteliselt massiivne osake, kuid tema levikaugus õhus on väike (1-2 cm) ja paber või nahk neelab selle täielikult. Alfakiirgus võib siiski olla ohtlik, kui ta satub kehasse sissehingamise või neelamise käigus, sest lähikoed nagu kops või kõhu sisekoed võivad saada suure kiirgusdoosi.

Beetakiirguse

(β) moodustavad elektronid, mis eralduvad ebastabiilsest tuumast. Beetaosakesed on alfaosakestest tunduvalt väiksemad ja võivad tungida sügavamale materjalidesse või kudedesse. *Beetakiirgus* neeldub plastikus, klaasis või metallikihis täielikult. Tavaliselt ei tungi see naha pealispinnast sügavamale. Siiski võib ulatuslikum kokkupuude suure energiaga beetakiirgajatega põhjustada nahal põletusi. Sellised kiirgajad võivad ohtlikuks osutuda ka sissehingamise või neelamise käigus kehasse sattudes.



Gammakiirguse

(γ) moodustavad väga kõrge energiaga footonid (teatud elektromagnetiline kiirgus nagu valgus), mis eralduvad ebastabiilsest tuumast, mis samal ajal võib kiirata ka beetaosakesi. Gammakiirgus põhjustab ainet läbides, eelkõige kokkupuutumisel elektronidega, aatomite ionisatsiooni. Kiirgus on suure läbimisvõimega ja ainult väga paks tiheda aine kiht nagu teras või plii võib olla heaks varjestuseks. Gammakiirgus võib siseelundeid tugevalt mõjutada ka ilma et seda sisse hingataks või neelataks.

Röntgenkiirguse

moodustavad kõrge energiaga footonid (sarnased gammakiirgusele), mida kutsutakse esile kunstlikult elektronkiire järsu pidurdamisega. Röntgenkiirgus on samamoodi suure läbimisvõimega ja ilma tiheda materjali kaitsekihita võib see põhjustada siseelunditele suuri kiirgusdoose.

Neutronkiirguse

(η) moodustavad neutronid, mis eralduvad ebastabiilsetest tuumadest, eriti aatomi lagunemise ja tuumade liitumise ajal. Ehkki neutroneid esineb kosmilistes kiirtes, kutsutakse neid tavaliselt esile tehislikult. Neutronid on elektriliselt neutraalsed ja seetõttu väga suure läbimisvõimega. Kokkupuutes aine või kudedega kutsuvad nad esile beeta- ja gammakiirgust. Neutronkiirguse mõju vähendamiseks on vajalik väga tugev varjestus.

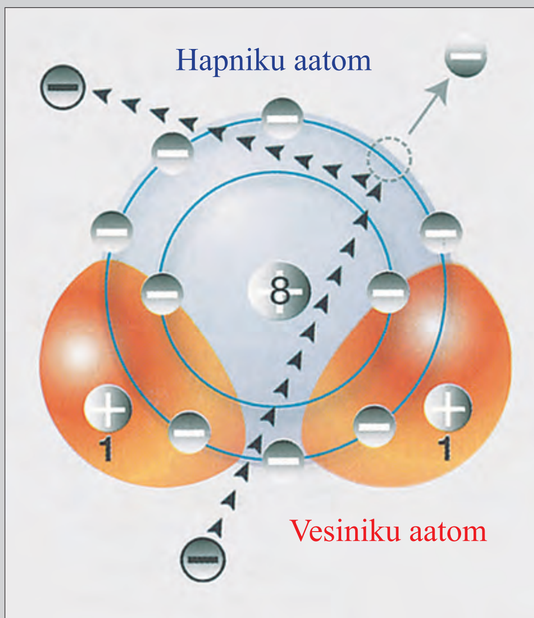
Kosmiline kiirgus

tuleb avakosmosest. See on segu mitmetest erinevatest kiirguse liikidest, seal hulgas prootonid, alfa-osakesed, elektronid ja teised erinevad suure energiaga osakesed. Kõik need osakesed on tugevas vastastikmõjus atmosfääriosakestega ning selle tulemusel moodustavad kosmilise kiirguse peamise osa maapinnal müüonid, neutronid, elektronid, positronid ja footonid. Valdav osa maapinnal saadavast doosist tuleb müoonidest ja elektronidest.

Peatükk 3 **Kiirgus ja aine**

Kiirgus annab ainet läbides oma energia üle selle aine osakestele. Elektrilaenguga alfa- ja beetaosakesed annavad vastastikuses *elektrilises* toimes aines sisalduvate elektronidega ainele üle energiat. Gamma- ja röntgenkiired kaotavad energiat erineval viisil, kuid mõlema puhul on tegemist (orbitaal)elektronide vabastamisega aatomist, mis siis annavad energiat üle vastastikuses toimes teiste elektronidega. Ka neutronid kaotavad energiat erinevatel viisidel, millest olulisemaks on kokkupõrked prootoneid sisaldavate tuumadega. Prootonid pannakse selle tagajärjel liikuma ning kuna neil on laeng, annavad nad omakorda energia üle vastastikuse elektrilise mõju kaudu. Seega kiirgus põhjustab igal juhul aines vastastikuseid elektrilisi mõjutusi.

Mõnel juhul võib elektron aines saada piisavalt energiat, et lahkuda aatomist ning jätta maha positiivse laenguga aatom või molekul. Joonis näitab, kuidas see toimub vee molekuli puhul. Molekulil on kokku kümme prootonit ja kümme elektroni. Kui laetud osake liigub mööda, jääb alles ainult üheksa elektroni, molekul aga saab ühe liigse positiivse laengu.



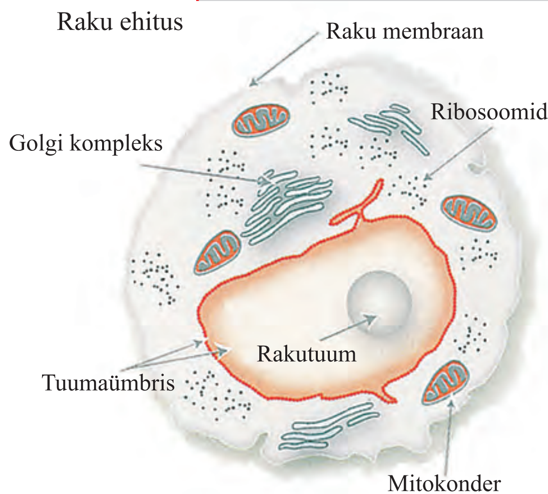
Vee molekuli ioniseerimine laetud osakesega

Protsessi, mille käigus neutraalne aatom või molekul omandab laengu, nimetatakse *ionisatsiooniks* ja selle tulemusel tekkivat üksust iooniks. Aatomi juurest eraldunud elektron võib omakorda ioniseerida teisi aatomeid või molekule. Ükskõik millist *ionisatsiooni* esile kutsuvat kiirgust – kas vahetut nagu alfa- ja beetaosakeste puhul või kaudset nagu gamma- ja röntgenkiirte ja neutronite korral – tuntakse kui ioniseerivat kiirgust. Aatomeid läbivad laetud osakesed võivad samuti anda energiat aatomi elektronidele, ilma et viimased aatomist lahkuksid. Sellist protsessi nimetatakse *ergastamiseks*.

Ionisatsioon kudedes

Laetud osake kaotab energiat iga kord, kui ta ioniseerib või ergastab aatomit, kuni tal lõpuks pole enam piisavalt energiat aatomi mõjutamiseks. Selliste energiakadude lõplik tulemus on tühine temperatuuri tõus aines, mille koostisesse aatom kuulub. Sel viisil hajub kogu ioniseeriva kiirguse mõjul kudedele üle antud energia soojusena, mida tekitab aatomite ja molekulaarstruktuuride suurenenud vibratsioon. Kahjulikke bioloogilisi mõjusid põhjustavad esmane ionisatsioon ja sellele järgnevad keemilised muudatused.

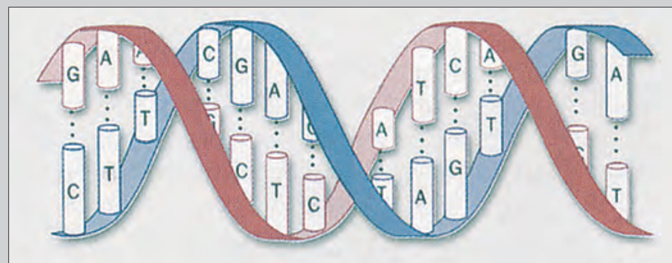
Raku ehitus



Bioloogiliste kudede ehitusühik on rakk, mille talitlust kontrollib tuum. *Rakutuum* on väga keeruline struktuur, mida ei tohi segi ajada aatomituumaga. Umbes 80 protsenti raku koostisest moodustab vesi, ülejäänud 20 protsenti aga keerulised bioloogilised ühendid. Kui ioniseeriv kiirgus läbib rakulist kude, tekitab ta laetud vee molekule. Need lagunevad ühenditeks, mida nimetatakse *vabadeks radikaalideks* nagu näiteks vaba hüdroksüülradikaal (OH), mis koosneb hapniku ja vesiniku aatomist. Vabad radikaalid on keemiliselt väga aktiivsed ja võivad muuta raku elutähtsaid molekule.

Üks eriti tähtis molekul on desoksüribonukleiinhape, DNA, mida leidub peamiselt rakutuumas. DNA kontrollib raku ehitust ja elutegevust ja toodab iseenda koopiaid. DNA molekulid on suured ning struktuure, mille koostisesse nad kuuluvad ja mida nimetatakse *kromosoomideks*, võib näha mikroskoobiga. Me ei mõista praegugi täielikult, kuidas kiirgus kahjustab rakke, kuid suurel määral on see seotud DNA muutustega. See võib toimuda kahel viisil. Kiirgus võib ioniseerida DNA molekuli, mille tagajärjeks on otsene keemiline muudatus, või muudetakse DNA kaudselt vastastikuses toimes vaba hüdroksüülradikaaliga, mis on kiirguse tagajärjel tekkinud vee molekulist. Mõlemal juhul võib keemiline muutus põhjustada kahjulikku bioloogilist mõju, mille tagajärjeks võib olla vähi teke või päritud geneetiliste defektide ilmnemine. Peatükk 5 käsitleb kiirguse mõjusid põhjalikumalt.

DNA diagramm



Erinevat liiki ioniseeriva kiirguse kõige tähtsam omadus on võime ainet läbida. Teatud tüüpi kiirguse läbitungimisvõime suureneb tema energia kasvuga, kuid varieerub erinevate kiirgustüüpide puhul sama energiahulga juures. Laetud osakeste puhul nagu alfa- ja beetaosakesed sõltub läbitungimisvõime ka osakese massist ja laengust. Võrdse energia korral tungib beetaosake märgatavalt sügavamale kui alfaosake. Alfaosake peaaegu ei suuda tungida läbi inimese naha pealmise, surnud kihi, ning nad pole ohtlikud seni, kuni nad ei satu kehasse hingamise või söömise käigus või läbi lahtise nahahaava. Beetaosakesed tungivad koes umbes sentimeetri sügavusele, seega on neid eraldavad radionukliidid ohtlikud pealiskudedele, siseorganitele muutuvad nad ohtlikuks alles siis kui nad kehasse satuvad. Kaudselt ioniseeriva kiirguse puhul nagu gammakiired ja neutronid oleneb läbitungimisvõime vastastikusest toimest koega. Gammakiirgus suudab läbida keha, seega seda eraldavad radionukliidid on ohtlikud nii kehaväliselt kui -siseselt. Ka röntgenkiired ja neutronid on võimelised keha läbima.

Doosi suurused

Me ei suuda ioniseerivat kiirgust meeltega tajuda, kuid võime seda avastada ja mõõta kasutades erinevaid meetodeid ning vahendeid, mille seas on *fotofilmid*, *geigermülleri torud* ja *stsintillatsioonloendurid.* Kasutatakse ka uuemaid tehnikaid, mis põhinevad näiteks *termoluminestseeruvatel materjalidel* ja *silikoondioodidel*. Läbiviidud mõõtmisi võime väljendada energiaühikutes, mida kiirgus annaks üle inimkehale või kehaosale. Kui otsene mõõtmine pole võimalik – näiteks radionukliid asub organismis, siis saame vastavas elundis neeldunud doosi arvutada, kui teame elundisse jäänud aktiivsuse suurust.

Energia hulka, mille ioniseeriv kiirgus annab üle aine – näiteks inimkoe massiühikule, kutsutakse *neeldunud doosiks*. Seda väljendatakse ühikuga grei (sümbol Gy), kus üks grei võrdub ühe džauliga kilogrammi kohta. Sageli kasutatakse grei alamjaotusi nagu milligrei (mGy), mis on üks tuhandik greid. Grei sai nimetuse inglise füüsiku Harold Gray järgi *(foto lk 13).*

Ioniseeriva kiirguse liigid erinevad orgaanilistele ainetele avaldatava toime alusel, nii et võrdsed neeldunud doosid, mille all mõeldakse võrdset hulka üleantud energiat, ei tarvitse avaldada samasugust bioloogilist mõju. Näiteks alfakiirguse 1 Gy mõju koele on kahjulikum kui beetakiirguse 1 Gy mõju, sest aeglasem ja suurema laenguga alfaosake kaotab liikudes rohkem energiat, kuna tal on raskem kudet läbida. Niisiis on erinevat tüüpi ioniseeriva kiirguse potentsiaalse kahjulikkuse samal alusel võrdlemiseks vaja muud mõõtu. Selleks sobib *ekvivalentdoos*, mille ühik on *siivert* (sümbol Sv). Sageli kasutatakse siiverti kordseid nagu millisiivert ehk mSv, mis on üks tuhandik siivertit. Siivert on saanud nimetuse rootsi füüsiku Rolf Sieverti järgi *(foto lk 13).*

Ekvivalentdoosi leidmiseks korrutatakse neeldunud doos faktoriga, mis võtab arvesse viisi, kuidas kiirgus koele energiat üle annab, nii et saame arvutada selle suhtelist võimet põhjustada bioloogilisi kahjustusi. Gamma- ja röntgenkiirguse ning beetaosakeste jaoks on selleks kiirguse kaalufaktoriks võetud 1 ning neeldunud doos ja ekvivalentdoos on arvuliselt võrdsed. Alfaosakeste puhul on faktor 20, nii et ekvivalentdoos on 20 korda suurem kui neeldunud doos. Erineva energiaga neutronite kaalufaktorite väärtused jäävad vahemikku 5-20.

Doosi suuruste hierarhia

Neeldumisdoos: kiirguse poolt massiühikule üle antud energia

Ekvivalentdoos: neeldumisdoos arvestades erinevate kiirgustüüpide omadusi

Efektiivdoos: ekvivalentdoos arvestades erinevate kudede või organite kiirgustundlikust

Kollektiivne efektiivdoos: kiirgusallika poolt elanikkonnale põhjustatav efektiivdoos

Selliselt defineerides kirjeldab ekvivalentdoos tõenäolist ohtlikkuse määra konkreetsele koele või elundile sõltuvalt kokkupuutest kiirgusega, olenemata kiirguse liigist. Nii põhjustab näiteks 1 Sv alfakiirgust kopsule samasuguse eluohtliku kopsuvähi tekkeriski kui 1 Sv beetakiirgust. Erinevate kehaosade risk varieerub sõltuvalt elundist. Näiteks pahaloomulise kasvaja tekkimise risk ekvivalentdoosi ühiku kohta on kilpnäärme puhul madalam kui kopsu puhul. Veel enam, on olemas olulised kahjustuste tüübid nagu healoomulised kasvajad või tõsise päriliku kahjustuse oht, mida põhjustab munandite või munasarjade kokkupuude kiirgusega. Need mõjud erinevad nii tüübilt kui ulatuselt ja me peame nendega arvestama, kui hindame inimese üldist kiirguse tagajärjel tekkinud tervisekahjustust. Nende komplikatsioonidega saame hakkama, kui võtame ekvivalentdoosi peamistes keha kudedes ja organites ning korrutame selle kaalufaktoriga, mis on seotud sellele konkreetsele koele või organile iseloomuliku riskiga. Nende kaalutud ekvivalentdooside summa on suurus, mida nimetatakse *efektiivdoosiks*. Efektiivdoos võimaldab meil kirjeldada erinevaid doosi ekvivalente kehas konkreetse arvuna. Efektiivdoos võtab arvesse ka kiirguse energiat ja liiki ning sellest tulenevalt annab ulatusliku viite tervisekahjustuse kohta. Veel enam, see kehtib võrdselt nii välis- kui sisekiirgusega kokkupuute ning ühtlase ja ebaühtlase kiirguse korral.

Efektiivdoosi arvutamine

Arvestades olukorda, milles radionukliid põhjustab kopsu, maksa ja luude pealispinna kiirituse.

Oletada, et ekvivalentdoosid kudedes on vastavalt 100, 70 ja 300 mSv.

Efektiivdoosi arvutatakse (100 × 0.12) + (70 × 0.05) + (300 × 0.01) = 18.5 mSv

Arvutus näitab, et kahjustuste tekkimise risk on sama suur, kui kogu keha saaks ühtlaselt doosi 18,5 mSv

Kude või elund	***Koefaktor***
Sugunäärmed	0.20
Luuüdi	0.12
Käärsool	0.12
Kops	0.12
Magu	0.12
Põis	0.05
Rinnad	0.05
Maks	0.05
Söögitoru	0.05
Kilpnääre	0.05
Nahk	0.01
Luuümbris	0.01
Muu	0.05
Kogu keha kokku	1.00

Vahel on vajalik mõõta kiirguse kogudoosi inimeste rühmadele või kogu elanikkonnale. Summaarset kogust kirjeldav doos on *kollektiivne efektiivdoos*. Selle leidmiseks liidetakse kiirgusallikaga kokku puutunud rühma või elanikkonna kõikide üksikisikute efektiivdoosid. Näiteks kõikidest kiirgusallikatest saadav efektiivdoos on keskmiselt 2,8 mSv aastas. Et maailmas on umbes 6 miljardit inimest, siis kogu elanikkonna kollektiivne efektiivdoos aastas on nende kahe arvu korrutis – umbes 17 miljonit *inimsiivertit* (sümbol inimSv).

Tavaliselt kasutatakse efektiivdoosi asemel väljendit doos ja kollektiivse efektiivdoosi asemel *kollektiivdoos*. Nii tehakse ka järgnevates peatükkides, välja arvatud juhtudel, kus detailne täpsus on oluline.

Peatükk 4 Ioniseeriva kiirguse allikad

Ioniseeriva kiirgusega puutume kokku erineval viisil. See tekib looduslikes protsessides nagu uraani lagunemisel maapinnas ning inimtegevuse tagajärjel nagu röntgenkiirguse kasutamisel meditsiinis. Seega võime vastavalt tekkimisele liigitada kiirguse looduslikuks või tehislikuks. Looduslikud kiirgusallikad on kosmiline kiirgus, gammakiirgus maapinnast, radooni lagunemisproduktid õhus, ja erinevad radionukliidid, mis esinevad looduslikult toidus ja joogis. Tehisallikateks on meditsiiniline röntgenkiirgus, radioaktiivne saaste, mis tekib tuumarelvade katsetamisel atmosfääris, tuumatööstuse radioaktiivsete heitmete vabanemine keskkonda, tööstuslik gammakiirgus, ja muud tekitajad nagu näiteks tarbekaubad. Järgmistes peatükkides kirjeldatakse mõlemat liiki allikaid lähemalt.

Igal kiirgusallikal on kaks olulist iseloomustajat – kui suure doosi annab see inimesele, ja kui lihtsalt on võimalik selle doosi suurust mõjutada. Alles hiljuti peeti looduslikest allikatest pärinevat kiirgust nii märkamatuks kui muutumatuks – ühesõnaga taustnähtuseks. Praegu aga teame, et radoongaasi (mis omakorda tekib uraani lagunemisel) lagunemissaaduste hulk elamutes võib olla mõnes piirkonnas märkimisväärselt kõrge, ehkki olemasolevates elamutes on seda üsna lihtne vähendada ja uute elamute ehitamisel vältida. Teistest looduslikest allikatest pärit kiirguse toime muutmiseks ei ole aga eriti midagi võimalik ette võtta. Foon, mis moodustub kosmilisest kiirgusest, gammakiirgusest ja organismi looduslikust radioaktiivsusest, põhjustab elanikule keskmiselt aastase doosi suurusjärgus 1 mSv. Tegelikkuses pole enamikul inimestest võimalik vältida samas suurusjärgus radooni lagunemissaaduste poolt tekitatud doosi.

Enamikul juhtudest on lihtsam kontrollida tehisallikatest pärinevat kiirgust, sest me saame muuta või isegi lõpetada kiirguse tekitamise protseduure, järgides seejuures alati optimeerimise printsiipi. Näiteks on oluline pöörata tähelepanu röntgenkiirguse poolt põhjustatavatele doosidele meditsiinilistes uuringutes, kuid pole mõistlik doose alandada seal, kus tagajärjeks võib olla diagnoosi määramiseks hädavajaliku informatsiooni kaotsiminek.

1955. aastal asutati ÜRO aatomikiirguse mõjude teaduslik komitee (UNSCEAR) ülesandega hinnata võimalikku ohtu tervisele, mida põhjustab tuumarelvade atmosfääris katsetamisel tekkiv radioaktiivne saaste. Praegu avaldab UNSCEAR regulaarselt andmeid kõikidest allikatest pärineva kiirguse dooside kohta. Kõige viimase ülevaate tulemused, mis avaldati 2000. aastal, on kujutatud järgmisel lehel toodud joonisel. Kogu maailma elanikkonna keskmiseks kogudoosiks aastas on umbes 2,8 mSv. Sellest kogudoosist üle 85% on pärit looduslikest allikatest, sellest omakorda pool põhjustavad radooni lagunemisproduktid elamutes. Patsientide kokkupuude meditsiinilise kiirgusega moodustab kogukiiritusest 14% ning vähem kui ühe protsendi kogukiiritusest moodustavad kõik tehiskiirgused – radioaktiivne saaste, tarbekaubad, kiirgustegevused ja tuumatööstuse heitmed – üheskoos.

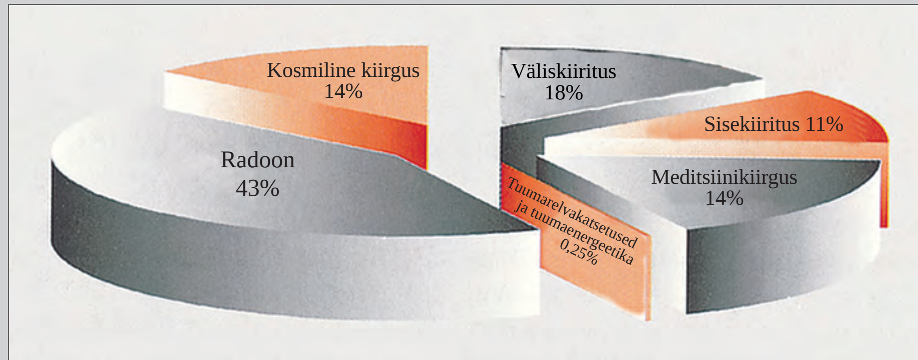
Harold Gray (1905–1965)



Rolf Sievert (1896–1966)

Koostatud ÜRO peaassambleele esitatud UNSCEAR 2000. aastaaruande tabelites 1 ja 2 toodud andmete põhjal

Keskmine kõikide kiirgusallikate poolt põhjustatud kiirgusdoos = 2.8 mSv/a



Suurim dooside varieerumine tuleb ette elamutes esinevate radooni lagunemisproduktide puhul, mille põhjustatavad aastadoosid võivad olla 10 mSv või rohkemgi. Tööalaselt kiirgusega kokkupuutuvate inimeste aastadoosi ülempiiriks sätestavad enamike riikide õigusaktid praegu 50 mSv, kuid ainult väga väike osa töötajatest saab aastas doosi, mis ületab 20 mSv. Suur hulk elanikkonnast saab juhuslikul kokkupuutel tehisallikatest lähtuva kiirgusega aastas doosi, mis on väiksem kui murdosa ühest millisiivertist. Mõne diagnostilise protseduuri puhul võivad patsientide doosid küündida 10 millisiivertini. Radioaktiivseid materjale sisaldavate tarbekaupade – nagu näiteks suitsuandurid ja helendavad numbrilauad – poolt põhjustatavad aastadoosid on kõige rohkem 1 µSv (üks miljondik siivertit), ehkki harvemini kasutatavad tooted nagu tooriumi sisaldavad hõõgsukad (gaasilambil) võivad teatud tingimustes põhjustada aastas 0,1 mSv suuruse doosi.

Keskmine aastadoos, mille maailma elanikkond saab kõikidest kiirgusallikatest

Allikas	***Doos (mSv)***
Looduslik	
Kosmiline	0.4
Gammakiirgus	0.5
Sisemine	0.3
Radoon	1.2
Tehislikud	
Meditsiiniline	0.4
Tuumakatsetused atmosfääris	0.005
Tšernobõli katastroof	0.002
Tuumaenergeetika	0.0002
Kokku (ümardatud) mSv	2.8

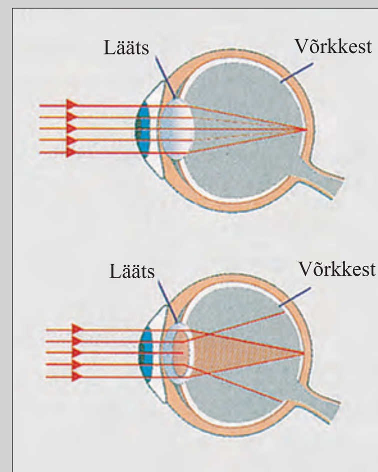
Peatükk 5 **Kiirituse mõjud**

Erineva suurusega kiirgusdoosid, mida saavad keha erinevad osad, võivad mõjuda tervisele erineval ajal erinevalt.

Väga suur doos kogu organismile võib põhjustada surma mõne nädalaga. Näiteks 5 grei suurune või suurem neeldunud doos, mis on saadud väga lühikese aja jooksul, põhjustab arvatavasti surma, kui ei ole võimalik anda ravi, sest kahjustatakse luuüdi ja seedekulglat. Õige ravi võib päästa inimese, kes on saanud 5 grei suuruse doosi, kuid kogu keha ulatuses saadud doos 50 greid on surmav isegi ravi korral. Väga kõrged doosid keha teatud osadele ei tarvitse olla eluohtlikud, kuid kiiresti võivad ilmneda teised mõjud. Näiteks silmapilgu jooksul neeldunud 5 grei suurune doos nahale põhjustab arvatavasti erüteemi – valulise naha punetuse – nädala jooksul, sama suur doos suguorganitele aga võib põhjustada steriilsust. Selliseid mõjusid kutsutakse *deterministlikeks* – nad ilmnevad ainult siis, kui doos või doosikiirus on kõrgemad kui teatud läviväärtus ning kui doos ja doosikiirus suurenevad, avaldub mõju varem ning tugevamalt. Deterministlikud mõjud indiviidile on kliiniliselt tuvastatavad kui kiirgusega kokkupuute tagajärjed, ehkki harvadel juhtudel, kus nende esilekutsujaks on õnnetused (vt ptk 14), ei ole alati suudetud tegelikku põhjust määrata.

Üks tüüp deterministlike tagajärgi ilmneb pikema aja möödumisel kiirituse saamisest. Tavaliselt pole need eluohtlikud, kuid võivad olla puudeks või takistuseks, sest teatud kehaosade funktsioneerimine on häiritud või tekivad mittepahaloomulised muutused. Kõige tuntumaks näiteks on kaed (silmaläätse läbipaistmatuks muutumine). Sellise seisundi kutsuvad tavaliselt esile suured – mitme grei suurused neeldunud doosid.

Kui doos on väiksem või see saadakse pikema ajavahemiku jooksul, on keharakkudel suurem võimalus paraneda ja varaseid kahjustuse tundemärke ei ilmne. Ometi võivad koed olla kahjustatud selliselt, et tagajärjed ilmnevad alles hilisemas elus – võib-olla mitmekümne aasta pärast või isegi kiirgust saanud inimese järglastel.



Silmaga nähtavad deterministlikud tagajärjed

Normaalne lääts – valgus koondatakse normaalselt võrkkestale

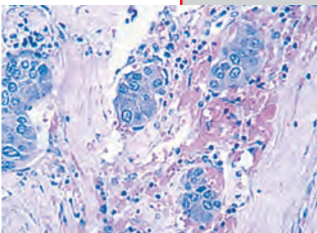
Kaega lääts – läätse läbipaistmatus takistab või moonutab valguse koondamist võrkkestale, tulemuseks on kahanenud nägemisvõime

Seda tüüpi mõjusid kutsutakse stohhastilisteks – ei ole kindel, et nad ilmnevad, kuid nende ilmnemise tõenäosus suureneb, kui doos suureneb, samal ajal kui mõju ajastus ja raskus ei sõltu doosist. Kiirgus ei ole nende tagajärgede ainus põhjustaja, ja seepärast pole tavaliselt võimalik kliiniliselt tuvastada, kas üksikjuhtum tekkis kiirituse tagajärjel või mitte.

Vähi tekitamine

Kõige olulisem stohhastiline tagajärg on vähk, mis on alati tõsine haigus ja sageli surmav. Ehkki enamikul juhtudel jääb vähi täpne tekkepõhjus selgusetuks või on vähe mõistetav, mängib kokkupuude selliste mõjuritega nagu tubakasuits, asbest ja ultraviolettkiirgus, samuti ioniseeriv kiirgus, kindlasti olulist osa teatud tüüpi vähkide esilekutsumises. Vähi areng on keeruline mitmeastmeline protsess, mis tavaliselt kestab aastaid. Kiirgus avaldab olulist mõju algstaadiumis, tekitades kudede normaalsete rakkude DNAs teatud mutatsioone. Need mutatsioonid võimaldavad rakul hakata vohama, mis mõnikord lõpeb pahaloomulise kasvaja tekkega.

Kilpnäärme follikulaar-kartsinoom A.K. Padhy/IAEA



Kuidas saame hinnata kiirguse põhjustatud vähitekkeriski, arvestades, et me ei suuda eristada kiirguse tagajärjel ja muudel põhjustel tekkinud vähijuhtumeid? Praktikas kasutatakse epidemioloogilisi andmeid – statistilisi erihaiguste juhtumiuuringuid (juhtumite arv ja nende levik) spetsiifilistes rahvastikurühmades. Oletame, et kiirgust saanud rühma indiviidide arv ja saadud doosid on teada. Uurides vähi esinemist rühmas ja võrreldes seda eeldatavate doosidega ja vähijuhtumitega muidu sarnases, kuid kiirgust mitte saanud rühmas, võime hinnata vähitekkeriski doosiühiku kohta. Tavaliselt nimetatakse seda *riskifaktoriks*. Väga oluline on kasutada sellistes kalkulatsioonides suurte inimrühmade andmeid, et viia statistiline määramatus miinimumini ja võtta arvesse vähi spontaanset arengut mõjutavad faktorid nagu vanus ja sugu.

Kõik vähijuhtumid ei lõpe surmaga. Keskmine suremus kiirgusest põhjustatud kilpnäärmevähki on umbes 10 protsenti (ehkki see on Tšernobõli katastroofi tagajärjel lastel ja teismelistel esineva kilpnäärmevähi korral palju madalam – alla 1 protsendi), rinnavähki umbes 50 protsenti ja nahavähki umbes 1 protsent. Üldiselt on ühtlaselt kogu organismile mõjuva kiirguse poolt vähi põhjustamise kogurisk umbes pool surmaga lõppeva vähi esilekutsumise riskist. Kiirguskaitses on surmaga lõppeva vähi tekkerisk tema erilise tähenduse tõttu suurimaks probleemiks. Eluohtliku vähi tekkerisk muudab võrdlused teiste elus ette tulevate eluohtlike riskidega lihtsamaks. Vastupidiselt sellele on väga raske võrrelda riske, mis ei ole eluohtlikud.

Riskihinnangud

Peamiseks infoallikaks vähi tekke lisariski kohta, mille põhjustab kogu keha kokkupuude gammakiirgusega, on 1945. aastal Hiroshima ja Nagasaki aatompommide plahvatustes ellujääjatega läbi viidud uuringud. Endiselt on elus üsna suur arv pommitamised üle elanud inimesi ja seetõttu on oluline prognoosida, kui palju vähijuhtumeid kiirgust saanud elanikkonnal veel võib tekkida. Selleks kasutatakse erinevaid matemaatilisi meetodeid, mis omakorda on veel üks riskihinnangu määramatuse allikas.

Määramatuse allikaks on ka asjaolu, et ellujääjate dooside suurust on võimalik hinnata vaid suvalise kättesaadava informatsiooni alusel, ja erinevad kalkulatsioonid on andnud mõnevõrra erinevaid tulemusi. Riskihinnangute tegemiseks kasutatakse ka väliskiirgust saanud inimeste andmeid – juhul kui erinevaid kudesid ja elundeid on kiiritatud röntgen- ja gammakiirtega healoomuliste ja pahaloomuliste kasvajate ravi ja diagnostika käigus, ja samuti Marshalli saarte elanike andmeid – nemad puutusid kokku atmosfääri tuumarelvakatsetuste tagajärjel tekkinud ulatusliku radioaktiivse saastega. Teavet alfakiirguse allikaks olevate radionukliidide mõjude kohta saadakse radooni ja selle lagunemisproduktide mõjualas tegutsevatelt kaevuritelt, töölistelt, kes puutuvad kokku raadium-226 ja luminestseeruva värviga, patsientidelt, kelle luuhaigusi ravitakse raadium-224-ga ja patsientidelt, kellele antakse röntgenkiirguse kontrastainet, mis sisaldab tooriumoksiidi.

UNSCEAR ja Rahvusvaheline kiirguskaitse komisjon (ICRP) vaatavad sellised andmed regulaarselt üle, et määrata kõige asjakohasemad riskihinnangud. ICRP tegeleb riskihinnangutega selleks, et töötada välja kiirguskaitse soovitused. IAEA arvestab oma kiirgusohutuse standardeid kavandades UNSCEAR ja ICRP soovitustega.

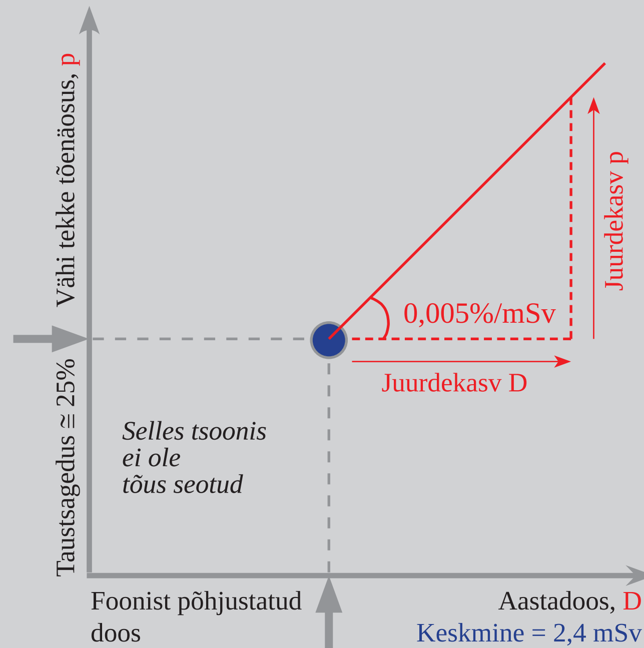
Vähi riskifaktorid

Enamus Jaapani aatompommiplahvatustes ellujääjaid ja teised kiiritust saanud rühmad, keda uuriti, olid lühikese ajavahemiku jooksul saanud kõrgeid doose. Vähi esinemissageduse uurimine koos saadud dooside hinnangutega nendes rühmades viitavad sellele, et kõrgete dooside ja suurte doosikiiruste puhul on doosi ja riski vahel lineaarne sõltuvus. See tähendab, et doosi kahekordistamine suurendab ka riski kahekordseks.

Enamasti tähendab kokkupuude kiirgusega siiski pikkade ajavahemike jooksul saadud madalaid doose. Selliste madalate kiiritustasemete juures ei anna vähi esinemise uurimine kiiritust saanud elanikkonna juures otseseid tõendeid doosi ja riski seoste kohta, sest täiendavate vähki haigestumiste arv, mille esinemist võiks eeldada kiirituse tagajärjel, on avastamiseks liiga väike (võrreldes vähijuhtumite koguarvuga). Seetõttu on vaja arvesse võtta teisi teaduslikke andmeid kiirguse mõjude kohta rakkudele ja organismidele ning kujundada hinnang kõige tõenäolisema doosi-riski seose kohta. Palju aastaid on rahvusvaheliselt aktsepteeritud järeldust, et seos on lineaarne ka madalamate dooside puhul suunaga nulli poole (nn lineaarne mittelävi ehk LNT hüpotees), mis tähendab, et iga kiirgusdoos - ükskõik kui väike - on kahjuliku mõjuga. Samas lubavad mõned radiobioloogilised eksperimendid oletada, et madalatel kiirgusdoosidel pole kahjulikku mõju, sest keha suudab edukalt kogu kiirguse põhjustatud kahjustuse neutraliseerida, või et madalad kiirgusdoosid võivad isegi stimuleerida rakkude isetaastusmehhanisme sellises ulatuses, et need suudavad vähi teket vältida. Teisi eksperimente on kasutatud teooriate tõestamiseks, et kiirguse madalad doosid on kahjulikumad (doosi ühiku kohta) kui kõrged doosid, või et kiirguse pärilikud mõjud muutuvad põlvkonnast põlvkonda kahjulikumaks.

Pärast ioniseeriva kiirguse bioloogiliste mõjude põhjalikku läbivaatamist järeldas UNSCEAR 2000. aastal, et: „...vähi tekkeriski suurenemine proportsionaalselt kiirgusdoosi suurenemisega on kooskõlas täienevate teadmistega ja jääb seega madalale doosile reageerimise kõige põhjendatumaks teaduslikuks selgituseks". UNSCEAR möönis samas, et määramatus jääb ning väitis, et: „rangelt lineaarset doosile reageerimise suhet ei saa igas olukorras oodata".

Doosi-riski hüpotees



Mõnda liiki tugevalt ioniseeriva kiirguse korral nagu alfakiirgus on riskifaktor väikeste ja suurte dooside korral sama, kuid nõrgalt ioniseerivate kiirguste korral nagu gammakiirgus on saadud arvestatavaid radiobioloogilisi tõendeid, et olukord on keerulisem. Seda liiki kiirguste jaoks on doosile reageerimise lineaarne sõltuvus sobiv selgitus erinevates doosi piirkondades, kui risk doosi ühiku kohta (lineaarse sõltuvuse tõus) on erinev – väiksem väikeste dooside ja doosikiiruste puhul ning suurem suurte dooside ja doosikiirguste korral. ICRP on hinnanud sellise meetodiga väikeste dooside tagajärjel tekkinud surmaga lõppevate vähijuhtumite riskifaktoreid, kasutades kahekordselt vähendatud kaalutud riskifaktorit.

Tegelikkuses sõltub antud doosi poolt põhjustatud risk konkreetse indiviidi jaoks selle isiku vanusest kiirgusega kokkupuutumise ajal ning isiku soost. Näiteks kui inimene saab doosi vanemas eas, ei tarvitse kiirguse poolt esile kutsutud vähi tekkeks jääda piisavalt aega, inimene sureb enne muul põhjusel. Rinnavähi risk meeste puhul on praktiliselt null, naiste puhul aga kaks korda kõrgem arvutuslikust keskmisest väärtusest $0,4 \times 10^{-2}$ või 1/250 siiverti kohta. Lisaks viitavad hiljuti saadud andmed sellele, et isiku geneetiline struktuur võib mõjutada kiirgusest põhjustatud vähi tekkeriski. Käesoleval ajal on teada vaid üksikud perekonnad, kelle genoom võib kanda kõrgendatud riski, kuid tulevikus suudavad eksperdid selliseid pärilikke soodumusi arvestustes võib-olla kasutada.

ICRP surmaga lõppevate vähijuhtumite riskifaktorid kogu elanikkonna kohta

Kude või organ	*Riskifaktor ($\times 10^{-2}$ Sv^{-1})*
Põis	0.30
Luuüdi	0.50
Luu pealispind	0.05
Rinnad	0.20
Käärsool	0.85
Maks	0.15
Kops	0.85
Söögitoru	0.30
Munasari	0.10
Nahk	0.02
Magu	1.10
Kilpnääre	0.08
Muu	0.50
Kokku (ümardatud)	**5.00**

Riskifaktorid on erinevad ka erinevates elanikkonna rühmades. Osaliselt on selle põhjuseks erinev vanuseline jaotus erinevates sotsiaalsetes rühmades. Näiteks tööliste sotsiaalse rühma keskmine vanus on üldiselt kõrgem (ja eeldatav eluiga vastavalt lühem) kui elanikkonnas tervikuna ja seetõttu on esimese rühma riskifaktor mõnevõrra madalam kui teisel. Tööliste ICRP riskifaktor on 4×10^{-2} või 1/25 siiverti kohta. Erinevad riskifaktorid võivad tuleneda ka ülekaalus olevate vähijuhtumite (või isegi teatud tüüpi vähkide) ja kõikide vähijuhtumite erinevustest, sest kiirgusest põhjustatud risk on eelduslikult seotud ülekaalus olevate vähijuhtumitega. Näiteks riskifaktor riikide puhul, kus vähki suremus on suhteliselt kõrge (arenenud maad) on kõrgem kui riikides, kus vähk pole nii levinud (arengumaad). Siiski on sellised erinevused üsna väikesed võrreldes ICRP riskifaktorite määramatusega ja seetõttu võib ICRP väärtusi, mis põhinevad viie täiesti erineva rahvusliku elanikkonna rühma tulemuste keskmistel näitajatel, põhjendatult kasutada.

Pärilikud haigused

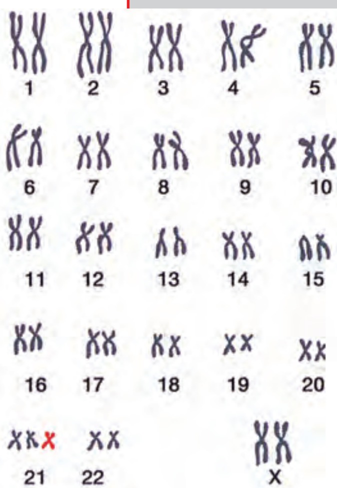
Teine peamine ajaliselt hiljem avalduv kiirguse mõju vähi kõrval on pärilikud haigused. Täpselt nagu vähi puhul, sõltub pärilike haiguste ilmnemise tõenäosus – kuid mitte raskus – doosist. Geneetiline kahjustus tekib munandite ja munasarjade kiiritamisel, mis meestel toodavad vastavalt spermarakke ja naistel munarakke. Ioniseeriv kiirgus võib tekitada nendes rakkudes või nendest moodustuvates tüvirakkudes mutatsioone, mille kahjulikud tagajärjed väljenduvad tulevastel sugupõlvedel. Mutatsioonid tekivad üksikute sugurakkude DNAs struktuuri muutusena, mille tulemusena kandub DNAs sisalduv pärilikkusinformatsioon tulevastele sugupõlvedele edasi. Võimalike pärilike haiguste raskusaste varieerub varajasest surmast ja rasketest vaimsetest hälvetest suhteliselt ohutute luustiku arenguhälveteni ja kergete ainevahetushäireteni.

Ehkki näib, et mutatsioonid tekivad inimese genoomis ilma selge põhjuseta, võivad looduslik kiirgus ja teised keskkonnamõjurid samuti esile kutsuda valdava osa pärilike haiguste ilmnemist või siis suurendada selle tõenäosust. Siiski pole leitud kindlaid tõendeid nende pärilike defektide esinemise kohta inimese järgmistes põlvkondades, mida saaks seostada loodusliku või tehiskiirgusega. Tuleb märkida, et aatompommiplahvatuste ohvrite järglaste ulatuslikud uuringud ei ole näidanud pärilike defektide statistiliselt olulist suurenemist. Selle asemel aitavad negatiivsed tulemused leida neile riskifaktori hinnangulist ülempiiri.

Pärilike kahjustuste kohta, mida ioniseeriv kiirgus kutsub esile loomadel, peamiselt hiirtel, on läbi viidud ulatuslikud eksperimentaaluuringud. Need hõlmavad laia dooside ja doosikiiruste vahemikku ja näitavad selgesti, et ioniseeriv kiirgus põhjustab mutatsioone. Tulemused annavad ettekujutuse ka sagedusest, millega teatud doosid põhjustavad pärilikke defekte. Aatompommiplahvatuse üleelanute andmetega kõrvutades võimaldab see informatsioon hinnata pärilikkuse riski inimesele. Nende tulemuste põhjal on ICRP hinnanud rasketesse pärilikesse haigustesse haigestumise riski väikeseid doose ja doosikiirusi saaval elanikkonnal.

Haiguste puhul, mis ilmnevad ükskõik millal kõikides tulevastes põlvkondades hinnati riskifaktoriks 1,0 × 10^{-2} Sv^{-1} ehk 1/100 siiverti kohta. Mutatsioonid, mille tagajärjel tekivad eranditult pärilikud haigused nagu hemofiilia ja Downi sündroom, moodustavad umbes poole koguarvust, ülejäänud haigused nagu diabeet ja astma langevad niinimetatud multifaktoriliste haiguste rühma. See riskihinnang sisaldab arvestatavat määramatust eriti multifaktoriliste haiguste osas, mille puhul tervisehäireid mõjutavad geneetilised ja keskkonnafaktorid on raskesti mõistetavad.

Munandite ja munasarjade kiiritamine toob kaasa riski pärilikeks mõjudeks vaid siis, kui kiiritamine toimub enne elu paljunemisfaasi jõudmist või selle ajal. Arvestades, et töötava elanikkonna sigimisvõimeline osa on madalam kui elanikkonnal üldiselt, on töötajate riskifaktor väiksem. ICRP hindab kõikide tulevaste põlvkondade rasketesse pärilikesse haigustesse haigestumise riski töötava elanikkonna puhul 0,6 × 10^{-2} Sv^{-1} ehk 1/170 siiverti kohta.



Kromosoom 21 anomaalia Downi sündroomiga naisel

Kõige hilisemad hinnangud viitavad võimalusele, et pärilike mõjude riskid osutuvad väiksemaks kui varasemad hinnangud, eriti multifaktoriliste haiguste osas. Oma 2001. aasta raportis ÜRO peaassambleele esitas UNSCEAR põhjaliku ülevaate kiirituse pärilikest riskidest. Elanikerühmas, kus ainult üks põlvkond oli kokku puutunud kiirgusega, hinnati järgmise põlvkonna riski 0,3–0,5 protsenti Gy kohta. See jääb vahemikku üks kolmandik kuni pool eespool toodud ICRP hinnangust kõikide põlvkondade kohta. Esimesele põlvkonnale järgnevate ükskõik milliste põlvkondade riskid on sellest seega oluliselt väiksemad. Teisiti väljendatult on see uus arvestuslik risk grei kohta suurusjärgus 0,4–0,6 protsenti inimkonna häirete baassagedusest.

Elanikkonna risk

Eeldus, et risk on proportsionaalne doosiga ning puudub doosilävi, võimaldab teha kaaluka järelduse, et kollektiivset efektiivdoosi saab kasutada elanikkonna alarühma kahjustamise indikaatorina. Selle käsitluse kohaselt pole matemaatiliselt oluline, kas elanikkonnas suurusega 50 000 inimest saab iga indiviid efektiivdoosi 2 mSv või elanikkonnas suurusega 20 000 saab igaüks 5 mSv – mõlema rühma kollektiivdoos on 100 inimsiivertit ja mõlemas rühmas on vähi tagajärjel viis surmajuhtumit ning tulevastes põlvkondades üks raske pärilik hälve. Väiksema elanikkonna liikmetel on seega suurem individuaalne risk haigestuda surmaga lõppevasse vähki. Siiski pole mõistlik kollektiivdooside arvestamist rakendada liiga ulatuslikult – lõpmatu inimhulga ja kaduvväikese doosi puhul on tulemus tõenäoliselt tähenduseta.

Kiiritus raseduse ajal

Emaüsas kiiritust saavate laste riskid väärivad erilist tähelepanu. Kui embrüo või loode saab kiiritust arenemise ajal, võivad tagajärjeks olla arenguhälbed nagu pea väiksem läbimõõt või vaimne alaareng. Aatompommiplahvatuse üleelanute puhul, kes said kiiritust enne sündimist, on täheldatud, et vaimne alaareng ilmnes peamiselt siis, kui kiirgust saadi 8.-15. nädalal peale viljastamist. Palju on vaieldud selle üle, milline on seos doosi ja reaktsiooni vahel ja kas eksisteerib lävi, millest allpool mõju ei esine. Kiirgusega kokkupuute seisukohalt kõige tundlikuma ajavahemiku osas (8-15 nädalat) väidab ICRP siiski, et IQ langus on otseselt seotud saadava doosiga, puudub läviväärtus ning langus ühe siiverti kohta on 30 IQ punkti. Kui näiteks loode saab raseduse nimetatud staadiumis 5 mSv kiiritust, viib see IQ langusele 0,15 punkti, mis tegelikkuses pole tuvastatav.

Kui embrüo või loode saab suuri doose, võib tagajärjeks olla surm või üliraske hälve. Selliste mõjude lävi on 0,1 kuni 1 Sv ning sõltub rohkem viljastamisest möödunud ajast. Loote geneetiliste riskide suurust pärast sündimist peetakse samaväärseks täielikult sigimisvõimelise rahvastiku riskidega, nimelt $2,4 \times 10^{-2}$ Sv^{-1} ehk 1/40 siiverti kohta. Enne sündimist saadud kiiritus võib suurendada lapseeas pahaloomulistesse kasvajatesse haigestumise riski. Kuni 15aastaste laste puhul hinnatakse riski haigestuda surmaga lõppevasse vähki umbes $3,0 \times 10^{-2}$ Sv^{-1} ehk 1/30 siiverti kohta, ja üldine vähki haigestumise risk on umbes kaks korda suurem.

Eelnevat arvestades on rasedatel naistel kõige otstarbekam vältida diagnostilist röntgenkiirgust kõhu piirkonnas, kui just raseduse lõpuni ootamine ei ole võimalik. Kahtlemata oleks kõikidel sigimiseas naistel, kui rasestumise võimalus pole põhimõtteliselt välistatud, mõistlik seada diagnostilisi protseduure, mille käigus vaagnapiirkond saab kõrgeid doose, menstruatsioonitsükli algusosale, kus rasestumine on kõige vähem tõenäoline. Doosidele, mida võivad saada rasedad naised, kes töötavad kiirgusallikatega, on kehtestatud eripiirangud, mille eesmärk on tagada sündimata lastele samasugune kaitstuse tase, mis on ette nähtud ühiskonna liikmetele.

Kiirguse kahjulikud mõjud

Kiirituse saamise asjaolud	*Mõjud tervisele*	*Informatsiooni allikas*
	Kiiresti ilmnevad mõjud	
Suur doos ja doosikiirus suuremale osale kehast naha piires munandid ja munasarjad	Surm Erüteem Steriilsus	Erinevatest allikatest pärinevad andmed inimeste kohta
	Pikema aja vältel ilmnevad mõjud	
Ükskõik milline doos või doosikiirus Risk sõltub doosist Ilmneb aastaid hiljem	Erinevad vähid	Inimese riskifaktorid, mida hinnatakse ekstrapoleerides inimeste poolt saadud suurte dooside ja doosikiiruste andmeid
Ükskõik milline doos või doosikiirus Risk sõltub doosist Ilmneb järglastel	Pärilikud mõjud	Inimeste riskifaktorid tuletatud loomadega tehtud katsete andmetest juhul kui inimese kohta käivad andmed puuduvad
Suur doos ükskõik mis doosikiirusega Ilmneb erineval ajal	Funktsionaalne kahjustus	Erinevatest allikatest pärinevad andmed inimeste kohta
Doos üsas Ilmneb lapsel	Vaimne alaareng	Piiratud andmed inimeste kohta

Peatükk 6 **Kiirguskaitse süsteem**

Kogu maailmas on suhtumine ioniseeriva kiirguse eest kaitsmisesse märkimisväärselt sarnane. Selle peamiseks põhjuseks on hästi korraldatud ja rahvusvaheliselt tunnustatud raamistik.

ÜRO aatomkiirguse mõjude teaduslik komitee (UNSCEAR) uurib regulaarselt keskkonnas esinevaid looduslikke ja tehislikke kiirgusallikaid, millega inimesed kokku puutuvad, neist allikatest lähtuvat kiirgust ja sellega seotud riske. Komitee annab oma töö tulemustest jooksvalt aru ÜRO peaassambleele.

Rahvusvaheline kiirguskaitse komisjon (ICRP) on 1928. aastal asutatud valitsusväline teadusorganisatsioon, mis avaldab regulaarselt soovitusi, kuidas korraldada kaitset ioniseeriva kiirguse eest. Organisatsiooni reputatsioon tuleneb tema liikmete teaduslikust mainest ja soovituste asjakohasusest. Komisjoni prognoosid surmaga lõppevasse vähki haigestumise tõenäosuse kohta põhinevad Jaapani tuumaplahvatused üleelanute uurimisel ja nende hindamisel selliste organisatsioonide poolt nagu UNSCEAR.

Rahvusvaheline Aatomienergiaagentuur (IAEA) töötab vastavalt oma põhikirjale välja ohutusstandardeid, tehes vajadusel koostööd teiste asjaomaste rahvusvaheliste organisatsioonidega. IAEA toetub oma tegevuses eelkõige UNSCEAR ja ICRP tööle. Kui riik esitab vastava soovi, siis aitab IAEA kaasa ka ohutusstandardite rakendamisele riigis, kasutades selleks erinevaid vahendeid, sealhulgas teenuste osutamine ja väljaõppe korraldamine.

Üldised põhimõtted

Kõikide kiiritust suurendavate inimtegevuste puhul soovitab ICRP kolmel kesksel nõudel põhinevat kiirguskaitse süsteemi. Kõik nõuded võtavad arvesse ka sotsiaalse mõõtme – kaks esimest otseselt ja kolmas kaudselt – seega on õigete otsuste langetamine väga oluline.

ICRP kiirguskaitse süsteem kiirgustegevusteks

Tegevuse õigustamine

Ükskõik milline tegevus, mis toob kaasa kokkupuute kiirgusega, on lubatud ainult juhul, kui sellest saadav kasu on vähemalt piisav, et kompenseerida kiiritust saavatele üksikisikutele või isikute rühmadele kiirguse poolt põhjustatud kahjustused.

Kaitse optimeerimine

Ükskõik millisest tegevuses kasutatavast konkreetsest kiirgusallikast saadud doos üksikisikule peab jääma madalamaks kui ette nähtud doosipiirmäär ja kasutusele tuleb võtta kõik mõistlikud meetmed kaitse korraldamiseks jälgides, et kiirguse põhjustatav doos oleks „nii madal kui on võimalik mõistlikult saavutada" (mõiste ALARA-akronüüm ingliskeelsest fraasist As Low As Reasonably Achievable), arvestades majanduslikke ja sotsiaalseid tegureid.

Individuaalsete doosipiirmäärade rakendamine

Piirmäär tuleb määrata kiirgustegevuste käigus üksikisiku poolt saadavatele doosidele, välja arvatud meditsiinilise diagnostika või ravi käigus saadavad doosid.

Mõnel juhul, nagu näiteks pärast õnnetust, kus radioaktiivne materjal pääseb keskkonda või kui hoonetes tõuseb radooni tase kõrgeks, võib osutuda vajalikuks sekkuda, et vähendada kiirguse mõju inimestele. Sellistel puhkudel soovitab ICRP sekkumisteks mõeldud kiirguskaitse süsteemi, mille aluseks on kaks allpool toodud põhimõtet ja mis erineb esimesest loendist peamiselt sellega, et doosipiirmäärad üksikisikutele jäetakse arvesse võtmata. Piirmäärade selgitamine võib siiski nõuda täiesti ebaproportsionaalseid meetmeid võrreldes oletatava kasuga, ja satub seetõttu vastuollu esimese põhimõttega. Selle süsteemi rakendamine nõuab samuti otsuse langetamist.

Mõlemad kiirguskaitse süsteemid on kinnitatud rahvusvaheliste põhiliste ohutusnormidega kaitseks ioniseeriva kiirguse eest ja kiirgusallikate ohutuse kohta ehk BSSga, mida sponsoreerib IAEA koos viie teise rahvusvahelise organisatsiooniga.

ICPR kiirguskaitse süsteem sekkumiseks

Sekkumise õigustamine

Kavatsetud sekkumine peab tooma rohkem kasu kui kahju. See tähendab, et doosi alandamisest saadud kasu peab olema piisav, et õigustada sekkumise tagajärjel tekkivat kahju ja kulu, sealhulgas sotsiaalseid kulutusi.

Sekkumise optimeerimine

Sekkumise vorm, ulatus ja kestvus peavad olema valitud nii, et doosi alandamisest saadud puhaskasu, see tähendab doosi alandamisest saadud kasu, millest on lahutatud sekkumise kulu, oleks nii suur, kui on mõistlikult võimalik saavutada.

ICRP süsteem on laialdaselt üle võetud kogu maailma riikide seadusandlusesse. Käesolevas peatükis keskendume peamiselt tegevuste kaitsesüsteemidele, viimastes peatükkides aga vaatleme asjaolusid, mille puhul sekkumine võib olla vajalik.

Rakendusala

Tegevus tähendab inimtegevust, millega kaasneb kiirguse tahtlik kasutamine. Sellised kasutusalad on selgelt määratletud ja neid on võimalik reguleerida. Teiselt poolt me ei saa eriti midagi teha, et vähendada looduslikust kiirgusest saadud doosi, ehkki otstarbekas on sekkuda, kui inimesed puutuvad kokku kõrge radooni tasemega kodus või tööl. Maakide ja teiste materjalidega töötamisel, nagu nafta- ja gaasipuurtornides, kus looduslikult esinevate radionukliidide tasemed on kõrgemad, on vaja tagada töötajatele teatud kontroll kiirgusega kokkupuute üle.

Kiirguse kasutamine meditsiinis on peamiselt kliinilise põhjendatuse küsimus, sest selline tegevus teenib eelduste kohaselt patsiendi huve. Patsientide puhul ei ole dooside piirmäära kehtestamine mõistlik – see võib vähendada eeldatavat kasu. Siiski tuleks õigustamise ja optimeerimise põhimõtteid, mida käsitletakse järgmisena, rakendada täies ulatuses, eriti kui arvestada, et individuaalsete dooside alandamine toimub teatud vahemikus ja meditsiiniliste protseduuride käigus saadud kollektiivdoos on kõrge.

Tegevuste õigustamine

Esimene nõue tegevuste kiirguskaitse süsteemis rõhutab ilmset vajadust võrrelda kahjulikke kulusid kasudega. Kiirguse mõjud on enamasti vaid osa võimalikest kahjulikest tagajärgedest, mis võetakse arvesse sotsiaalsete ja majanduslike üldkulude arvutamisel. Juhul, kui leidub teisi võimalusi sama tulemuse saavutamiseks, kas kiirgusega või ilma, on oluline analüüsida alternatiivsete võimaluste kulusid ja tulusid enne lõpliku otsuse langetamist ühe või teise valiku kasuks.

Küsimused, mis õigustamise käigus tõusetuvad, ulatuvad kaugele väljapoole kiirguskaitse temaatikat ja neile on sobivaks illustratsiooniks *tuumaenergeetika* programmi argumendid. Programmi radioloogiliste tagajärgede hulka kuuluvad ka radioaktiivsete ainete vabastamine keskkonda ja doosid, mida töötajad saavad *tuumaenergeetikatööstuses*. Lisaks peaks täielik analüüs hõlmama ka õnnetusi, mis võivaid juhtuda tuumareaktoriga, samuti *radioaktiivsete jäätmete* käitlemist. Arvesse tuleks võtta ka uraanikaevurite (kes sageli ei asu maades, kus uraani kasutatakse) doosid ja nendega juhtuda võivad õnnetused.

Hinnata tuleks, millised tagajärjed on tuumaenergiast loobumisel või energia tootmiseks alternatiivsete allikate – näiteks söe – kasutamisel. Elektrienergia tootmine söest tekitab suuri jäätmekoguseid ja vabastab gaase, mis põhjustavad kasvuhooneefekti.

Uraani-kaevandamise jääkide hoidla Austraalias



Oktoober 2002



September 2003



Tuumajaam

Söel töötavad elektrijaamad vabastavad keskkonda ka toksilisi aineid ja radioaktiivseid materjale, söekaevurid kannatavad kutsehaiguste all ja alati on olemas potentsiaalne kaevandusõnnetuste oht. Täielik analüüs peaks seega arvestama paljusid strateegilisi ja majanduslikke faktoreid – erisusi, turvalisust, kättesaadavust ja erinevate kütuste varusid, erinevat tüüpi elektrijaamade ehitus- ja käitluskulusid, eeldatavat nõudlust elektrienergia järele ja inimeste valmisolekut teatud tööstusharus töötada.

Nõuetekohane õigustus on vajalik ka kiirguse kasutamiseks meditsiinilises diagnostikas. Vähesed meist seaksid tegevuse kahtluse alla – kasu on vaieldamatu, isegi kui individuaaldoosid on mõnedes uuringutes – ja kollektiivdoosid üldiselt – kõrged. Sellele vaatamata on iga protseduuri vaja põhjendada konkreetsete eeliste alusel. Massiline röntgenläbivaatus vähiennetuses, mis võib esile kutsuda rohkem vähijuhtumeid kui selle abil tõenäoliselt avastatakse, on selgelt vastuvõetamatu. Sellel põhjusel ei ole töötajate rutiinsele läbivaatusele kliinilist õigustust, välja arvatud erijuhtumid nagu tuberkuloosi vältimine. Meditsiiniline kiiritus raseduse ajal nõuab eriti kaalukaid põhjendusi ja hoolikaid meetodeid. Radioloogiline läbivaatus õiguslikest või kindlustuse eesmärkidest lähtuvalt ei ole tavaliselt õigustatud, välja arvatud juhul, kui see tuleb kasuks kiiritust saava isiku tervisele.

Aeg-ajalt soovitakse algatada tegevusi, mis ei ole piisavalt õigustatud – nende hulgas on radioaktiivset materjali sisaldavate mänguasjade ja ehete ning teiste esemete, näiteks turvasildid, valmistamine, mille tootmiseks on olemas täiesti sobivad mitteradioaktiivsed alternatiivsed võimalused.

Kaitse optimeerimine

Kuna ükski kiirgusdoos ei ole täiesti riskivaba, on oluline pöörata tähelepanu kõikidele doosidele ja neid vähendada alati, kui see on mõistlikult saavutatav. Järkjärgult jõutakse punktini, kus dooside edasine alandamine muutub ebamõistlikuks, sest sotsiaalsed ja majanduslikud kulud osutuvad alandamise väärtusest suuremaks. Teisest küljest ei ole konkreetse tegevusalaga seotud kasud ja riskid sageli ühiskonnas ühtlaselt jaotatud, seega teine nõue – ICRP soovitatud kaitse optimeerimine – sisaldab endas ka protseduuri piiranguid doosi- või riskipiirangute vormis, et vältida õigustamatut kokkupuudet kiirgusega.

Piiranguid seatakse tegevusaladel, kus kiirguse kasutamist alles planeeritakse. Töötajate jaoks peaks doosipiirangu väärtuse valima nii, et see kajastaks doosi väärtust aastas, see võib olla ka väike osa doosi piirmäärast, mida suudetakse mõistlikult saavutada teatud tööstusharus või protseduuri puhul. Üldsuse jaoks saab tüüppiirangut – 0,3 mSv aastas – kasutada plaanilise väärtusena uue kiirgusallika kasutuselevõtmisel näiteks tehases, kus kavatsetakse radioaktiivset materjali keskkonda vabastada.

Kaitse optimeerimist on hakatud viimase kahekümne aasta jooksul kogu maailmas üha olulisemaks pidama ja enamikus riikides jääb kiirgustöötajate keskmine aastadoos märgatavalt (10 või enam korda) alla ICRP soovitatud 20 mSv aastas. Mõned töötajate rühmad saavad doose, mis ületavad keskmist mitu korda ja mõned töötajad saavad rohkem kui 20 mSv aastas, kuid sellised juhtumid moodustavad koguarvust väga väikese protsendi. UNSCEARi analüüs näitab, et keskmine

aastadoos tehislikest allikatest on 0,6 mSv, samal ajal töötajate keskmine doos kohtades, kus on kõrgendatud looduslike radionukliidide sisaldus (näiteks kaevandused) on kõrgem – 1,8 mSv.

Enamuses riikides on üksikisikute aastadoosid tegevustest, mille käigus saadakse kiirgust, suudetud viia alla 0,3 mSv aastas, mis on ka esmane ICRP soovitatud doosipiirmäär elanikkonnale. Isegi inimrühmad, kes puutuvad kõige rohkem kokku tuumaseadmetest vabanenud radioaktiivsete materjalidega, sest nad elavad seadme lähedal või neil on spetsiifilised toitumisharjumused, saavad tavaliselt aastadoosid, mis moodustavad vaid murdosa sellest piirmäärast.

Doosipiirmäärad või juhendtasemed on kohaldatavad ka patsientide meditsiinilise kiirituse korral, kui eesmärgiks on dooside mõistlik minimeerimine. Mõne rutiinse meditsiiniprotseduuri käigus saadakse märkimisväärsed doosid (s.o mitu mSv) ja, mis on väga oluline, need võivad haiglate lõikes tugevasti erineda. Juhendtasemete kasutamine võib osutuda praktiliseks võimaluseks patsientide dooside alandamisel, ilma et arstid kaotaksid diagnoosi määramiseks vajalikku informatsiooni.

Doosi piirmäärad

Kolmas nõue tegevusele on kohustus mitte allutada üksikisikuid ja nende järglasi lubamatult suurele riskile. Seda täidetakse rangete doosi piirmäärade seadmise ja kaitse optimeerimise põhimõtte rakendamisega. BSS määrab töötajate doosipiirmääraks 20 mSv aastas (viie aasta keskmisena, kuid mitte üle 50 mSv aastas) ja elanikkonna jaoks 1 mSv aastas.

Rahvusvahelised doosi piirmäärad ja piirangud

Parameetrid	*Töötajad*	*Elanikud*
Efektiivdoos		
Esmane piirmäär	*20*[a]	*1*
Piirangud	*-*[b]	*0,3*[c]
Ekvivalentdoos		
Silmalääts	*150*[a]	*15*
Nahk[d]	*500*[a]	*50*
Jäsemed[e]	*500*[a]	*50*

Märkused:

a Üliõpilastele ja kutseõpilastele 2/3 sellest väärtusest
b Rahvusvaheliselt kokku lepitud väärtused puuduvad, piirangud tuleb seada vastavalt konkreetsele juhtumile, arvestades tööstusharu või käitluse olemust
c Prognoositud väärtus konkreetsele uuele kiirgusallikale
d Keskmine väärtus suvalisele 1 cm^2 suurusele nahapinnale
e Käsivarred ja pahkluud samavõrra käte ja jalgadega

Organisatsioonid, kes toetavad rahvusvahelisi põhilisi ohutusnorme

Toidu- ja Põllumajandus-organisatsioon*

Rahvusvaheline Aatomienergia-agentuur*

Rahvusvaheline Tööorganisatsioon*

OECD Tuumaenergia Agentuur

Üle-Ameerikaline Tervishoiuorganisatsioon*

Maailma Tervishoiuorganisatsioon*

* ÜRO agentuur



Esmased piirmäärad, mida väljendatakse efektiivdoosina, peavad aitama vältida ohtlike tagajärgede ilmnemist nagu vähk ja pärilikud kahjustused, võttes arvesse nende tekkimise tõenäosust. Teine piirmäärade kogum, mida väljendatakse ekvivalentdoosina, peab kaitsma silmi, nahka ja jäsemeid muude kahjustusvormide eest.

Doosi piirmääradega seoses esineb kaht liiki väärarusaamu. Esimese puhul arvatakse, et piirmäärad tähistavad järsku muudatust bioloogilises riskis, eraldusjoont turvalise ja mitteturvalise vahel. Arutelust doosi ja riski üle selgub, et see ei ole nii. See peaks järelduma ka faktist, et töötajate ja elanikkonna jaoks kehtivad erinevad doosi piirmäärad. Need piirmäärad erinevad, sest töötajatele, kes saavad tööandjatelt soodustusi, on kõrgemad riskid vastuvõetavamad kui elanikkonnale, kelle risk ei ole vabatahtlik. Teine väärarusaam seisneb selles, et dooside hoidmine alla piirmäära on kiirguskaitse ainus oluline nõue. Vastupidi, ülim nõue on hoida doosid nii madalad kui mõistlikult võimalik. See kajastub ka suureneval rõhuasetusel uurimistasemetele, mis on loomulikult seatud doosi piirmäärast madalamale.

Rahvusvahelised põhilised ohutusnormid

1996. aastal avaldatud BSS põhineb esmajoones eespool kirjeldatud ICRP kiirguskaitse süsteemil. Standardid kehtestavad üksikasjalikud nõuded ametialaseks, meditsiiniliseks ja elanike kokkupuuteks kiirgusega, ja määratlevad doosi piirmäärad ning erandid. Nad sätestavad selged nõudeid, mis peavad tagama kiirgusallikate ohutuse ja ette nägema tegutsemise tuumaõnnetuse korral. IAEA ohutusjuhendid annavad detailsemad juhised, kuidas konkreetsetes situatsioonides nõudeid järgida. Enamik riike rakendab neid standardeid oma seadusandluse ja regulatiivsete nõuete kaudu.

Regulatoorne infrastruktuur

BSS nimetab tehnilised, teaduslikud ja administratiivsed ohutusnõuded kiirguse ohutuks kasutamiseks. Siiski eeldatakse nende nõuete korral, et teatud kiirguskontrolli põhitingimused on eelnevalt täidetud. Selliseid põhieeldusi nimetatakse ka ohutuse infrastruktuuriks ja need hõlmavad seadusi ning määrusi, mis reguleerivad kiirguse ja radioaktiivsete materjalide kasutamist ning nende täitmise järgimist tagavate haldusasutuste tegevust. Riikides, kus on olemas tuumaenergeetika programm, on infrastruktuur reeglina välja arendatud. Ent selle infrastruktuuri olemasolu on vajalik (kasvõi väiksemas ulatuses) kiirguse igasuguse kasutamise puhul. Peaaegu kõik riigid kasutavad kiirgust mingil määral meditsiinis või tööstuses. BSS avaldamise ajal mõistis IAEA, et paljudes tuumaenergiat kasutavatel riikidel ei ole sobivat ohutuse infrastruktuuri ja seetõttu algatati ulatuslik projekt, et aidata neil tõsta kiirguse ohutu kasutamise haldussuutlikkust.

Peatükk 7 **Looduslik kiirgus**

Looduslik ioniseeriv kiirgus levib kõikjal keskkonnas. Kosmilised kiired jõuavad Maale avakosmosest. Maa on ise ka radioaktiivne. Looduslik radioaktiivsus on omane nii toidule, joogile kui õhule. Me kõik puutume loodusliku kiirgusega suuremal või vähemal määral kokku ja enamiku inimeste jaoks on see peamiseks kokkupuuteks radioaktiivse kiirgusega. Veel enam, inimeste, loomade ja taimede evolutsioon on kulgenud loodusliku radioaktiivse kiirguse taustal ja üldiselt ollakse seisukohal, et see ei kujuta märkimisväärset ohtu tervisele. Siiski leidub erandeid.

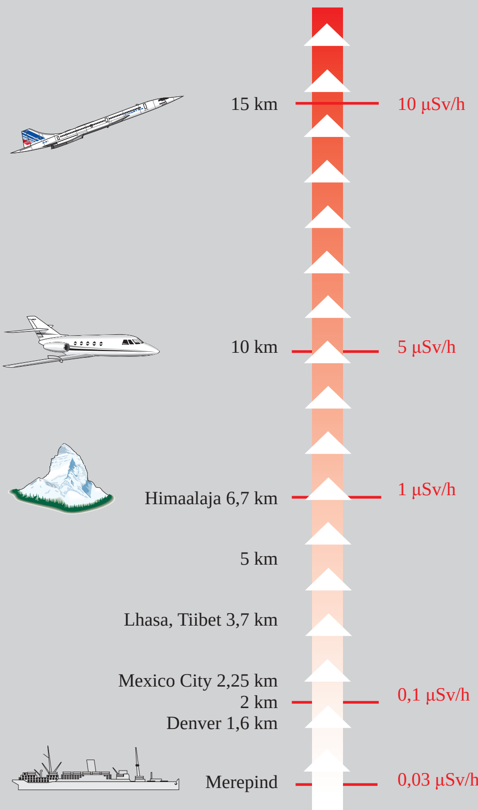
Kosmiline kiirgus

Kosmilised kiired on peamiselt teadmata kosmilise päritoluga ja väga kõrge energiaga prootonid, mis jõuavad meie atmosfääri üsna muutumatus koguses. On siiski teada, et mõned madalama energiaga prootonid saabuvad päikeselt ja eralduvad pursetena päikese loidete käigus. Prootonid on laetud osakesed, seetõttu satuvad nad atmosfääri sisenedes Maa magnetvälja – pooluste piirkonda satub neid rohkem kui ekvaatori alale, nii et doosikiirus suureneb laiuskraadi suurenedes. Atmosfääri tungides algatavad kosmilised kiired keerulisi reaktsioone ja neelduvad järk-järgult, nii et doosikiirus kahaneb kõrguse vähenedes. Kosmilised kiired on segu paljudest erinevat tüüpi kiirgustest, sisaldades prootoneid, alfaosakesi, elektrone ja teisi erinevaid haruldasi (kõrge energiaga) osakesi. Maapinnal koosneb kosmiline kiirgus eelkõige müoonidest, neutronitest, elektronidest, positronidest ja footonitest. Valdava osa doosist tekitavad müoonid ja elektronid. UNSCEAR on välja arvutanud, et kosmilistest kiirgusest põhjustatud aasta efektiivdoos maapinnal on keskmiselt umbes 0,3 mSv, mis varieerub sõltuvalt kõrgusest ja laiuskraadist.

Enamik inimesi elab madalamatel kõrgustel ja saab seega kosmilise kiirguse sarnaseid aastadoose (välja arvatud laiuskraadist tulenev varieerumine). Siiski leidub ka suurtes kõrgustes rahvastikurohkeid asustusi (näiteks Quito ja La Paz Andides, Denver Kaljumägedes, Lhasa Himaalaja mägedes), kus elanikud võivad saada aastadoose, mis on mitu korda kõrgemad merepinna tasemel elavate inimeste aastadoosidest. La Pazi aastaväärtus näiteks on maailma keskmisest viis korda suurem. Elamute tüübid võivad samuti kosmilise kiirguse doosi vähesel määral mõjutada. Kosmiline kiirgus on lennukõrgustel palju intensiivsem kui maapinnal. Mandritevahelistes lennukoridorides võivad doosid olla isegi kuni 100 korda kõrgemad kui maapinnal. Tavalised lennureisid põhjustavad täiendava keskmise aastadoosi 0,01 mSv (tihti lendavate üksikreisijate doosid on sellest keskmisest palju kõrgemad), kuid see ei mõjuta maailma keskmist aastadoosi 0,4 mSv.



Gammakiirgus



Kõik ained maakoores sisaldavad radionukliide. Kahtlemata on sügaval Maa sisemuses toimuvate looduslike protsesside energial maakoore kujunemisel ja sisetemperatuuri säilitamisel oma osa. See energia tuleb peamiselt uraani, tooriumi ja kaaliumi radioaktiivsete isotoopide lagunemisest.

Uraan on hajutatud kivimites ja pinnases madalates kontsentratsioonides mõni osake miljoni kohta (o/m). Kui kontsentratsioon maagis ületab 1000 o/m, on majanduslikult otstarbekas seda kaevandada ja kasutada tuumareaktorites. Uraan-238 on mitmetest elementidest koosneva radionukliidide pika rea lähteaine, mis jõuab lagunemiste tulemusena stabiilse nukliidini plii-206. Ahela lagunemissaaduste hulgas on ka radioaktiivse gaasi radooni isotoop radoon-222, mis võib sattuda atmosfääri jätkates seal radioaktiivset lagunemist. Toorium on samamoodi maapinnas hajutatud. Toorium-232 on lähteaineks teisele radioaktiivsele reale, mille käigus tekib radooni teine isotoop, radoon-220, mida kutsutakse ka torooniks. Kaalium on märgatavalt sagedasem kui uraan või toorium, moodustades 2,4 protsenti maakoorest. Radionukliid kaalium-40 aga sisaldab ainult 120 o/m stabiilset kaaliumi.

Loodusliku kiirguse poolt põhjustatavad aastased efektiivdoosid

Tabel 1 UNSCEARi 2000. aasta aruandest ÜRO peaassambleele

Allikas	*Maailma keskmine doos (mSv) vahemik*	*Tüüpiline doosivahemik (mSv)*
Kosmiline kiirgus	*0,4*	*0,3–1,0*
Gammakiirgus	*0,5*	*0,3–0,6*
Radoon hingamisteedes	*1,2*	*0,2–10*
Sisekiirgus	*0,3*	*0,2–0,8*
Kokku (ümardatud)	*2,4*	*1,0–10*

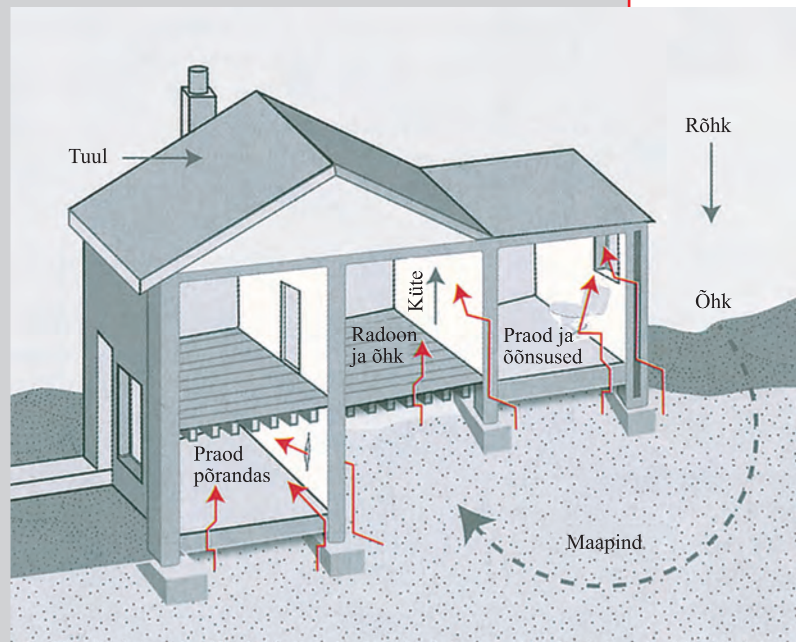
Radionukliidid maapinnal eraldavad läbistavaid gammakiiri, mis kiiritavad meid enam-vähem ühtlaselt. Et enamik ehitusmaterjalide toorainest kaevandatakse maapõuest, siis on needki kergelt radioaktiivsed ja põhjustavad selle, et inimesed saavad kiirgust nii siseruumides kui ka väljas. Doose, mida nad saavad, mõjutavad nii selle piirkonna geoloogilised omadused kui elamute ehitamise tavad, kuid looduslikest gammakiirtest saadud keskmine doos aastas jääb suurusjärku 0,5 mSv. Tegelikud väärtused varieeruvad märgatavalt. Osa inimesi võib saada keskmisest mõned korrad suuremaid või väiksemaid doose. Vähestes kohtades, kus radionukliidide kontsentratsioon maapinnas on looduslikult suhteliselt kõrge, nagu Kerala Indias ning Prantsusmaa ja Brasiilia teatud piirkonnad, võib põhjustatav doos olla kuni 20 korda maailma keskmisest suurem. Ehkki reeglina pole sellise doosi mõjutamiseks/vältimiseks peaaegu midagi võimalik ette võtta, oleks mõistlik võimaluse korral vältida ehitamist ebatavaliselt kõrge aktiivsusega piirkondades või selliseid materjale kasutades.

Radoon hingamisteedes

Radoon on eriti oluline loodusliku kiirguse allikas. Seda põhjustab asjaolu, et radoon- 222 vahetud lagunemissaadused on lühikese poolestusajaga radionukliidid, mis seovad ennast väikeste õhuosakestega. Need hingatakse sisse ja nad kiiritavad kopsukudesid alfaosakestega ning suurendavad kopsuvähki haigestumise riski. Sama kehtib radoon-220 (torooni) kohta, kuid kopsule põhjustatav doos on palju väiksem. Maapinnalt atmosfääri sattudes hajub radoongaas õhus, seetõttu on tema kontsentratsioon välisõhus madal. Kui gaas satub hoonesse – enamasti pinnasest läbi põranda – tõuseb aktiivsuskontsentratsioon suletud ruumis.

Kui hooneid õhutatakse, ei ole radoonil võimalust koguneda. Küll aga projekteeritakse paljudes – üldiselt külmema kliimaga – piirkondades hooned eelistatult nii, et need peaksid sooja ja ei laseks tuult läbi. Seetõttu on nende hoonete ventilatsioon sageli puudulik ja radooni kontsentratsioon siseruumides võib olla mitu korda suurem kui väljas. Radooni kontsentratsioonid hoonetes sõltuvad oluliselt ka kohalikest geoloogilistest tingimustest ja võivad riigi erinevates osades, aga isegi sama piirkonna erinevates hoonetes tugevalt varieeruda.

Kuidas radoon satub elamusse



Radooni lagunemissaadustest tekitatud üle maailma keskmistatud aastast efektiivdoosi hinnatakse umbes 1,2 millisiivertile. See väärtus aga varieerub märkimisväärselt. Mõnes riigis (näiteks Soomes) on riigi keskmine mitu korda kõrgem ja paljude maade elamutes saavad elanikud mitusada korda suuremaid efektiivdoose aastas. Seda arvestades on ICRP ja IAEA soovitanud kasutada tegutsemistasemeid (väljendatakse Bq/m^{-3}), millest kõrgemate väärtuste registreerimisel soovitatakse elamu valdajatel radooni taset elamutes vähendada.

Tüüpiliselt peaksid tegutsemistasemed jääma vahemikku 200-600 Bq/m^{-3}, mis on umbes kümme korda kõrgem kui keskmine radooni kontsentratsioon elamute siseõhus. Inimesed, kes avastavad, et radooni tase nende elamutes on kõrge, võivad selle alandamiseks takistada õhu sattumist maapinnast elamusse. Kõige tõhusam viis selleks on alandada väikese ventilaatori abil õhurõhku hoone all (keldris). Nagu kirjeldatakse peatükis 5, on selline toiming ICRP mõistes näide sekkumisest eesmärgiga vähendada inimese kokkupuudet ioniseeriva kiirgusega.

Kiirgus organismis

Radionukliide leidub ka toidus



Uraani ja tooriumi rea teised radionukliidid, eriti plii-210 ja poloonium-210 esinevad õhus, toidus ja vees ning kiiritavad keha seestpoolt. Kaalium-40 satub samuti kehasse tavalise toiduga. Radooni lagunemissaaduste kõrval on see sisekiirituse peamine allikas. Lisaks tekitavad kosmiliste kiirte ja atmosfääri vastastikune toime rea radionukliide nagu süsinik-14, mis samuti suurendab sisekiiritust.

Sisekiirituse keskmist aastast efektiivdoosi nendest allikatest hinnatakse 0,3 mSv suuruseks, millest umbes pool langeb kaalium-40 arvele. Teave selle kohta, kuidas kogusumma üksikisikute lõikes varieerub, on piiratud, ehkki teatakse, et kaaliumi sisaldust inimese kehas kontrollitakse bioloogiliste protsesside kaudu. Kaaliumi ja järelikult ka kaalium-40 hulk varieerub sõltuvalt keha lihasmassist ja on noortel meestel umbes kaks korda kõrgem kui vanematel naistel. Teiste radionukliidide tekitatud sisekiiritust on praktiliselt võimatu mõjutada, välja arvatud kõrge radioaktiivsusega toidu ja vee kasutamise vältimine.

Kogudoosid

Loodusliku kiirguse summaarne keskmine aastane efektiivdoos on umbes 2,4 mSv, kuid doosid võivad oluliselt varieeruda. Mõnede riikide keskmised doosid ületavad 10 mSv aastas ja mõnedes piirkondades võivad individuaalsed doosid olla isegi kõrgemad kui 100 mSv aastas. Viimast põhjustab tavaliselt radooni ja selle lagunemissaaduste eriti kõrge tase elamutes.

Keskmised doosid on kasulikud näitajad, kui soovitakse võrrelda loodusliku ja tehiskiirguse mõju tervisele. Suurte erinevuste esinemise korral keskmistest näitajatest, nagu siseruumide radooni puhul, on vaja lisaandmeid. Kõige otstarbekam on arvatavasti võtta arvesse sagedus, millega teatud suurusjärgu doosid vaatlusalustes tingimustes ilmnevad.

Peatükk 8 Kiirguse kasutamine meditsiinis

Ioniseerival kiirgusel on meditsiinis kaks väga erinevat kasutusala – diagnostika ja ravi. Mõlemal juhul tuleb lähtuda patsiendi huvidest ja alati tuleb järgida kiirguskaitse printsiipi – saadav kasu peab ületama võimaliku riski. Õigustamise printsiipi käsitlesime peatükis 6.

Enamik inimesi on oma elu jooksul kokku puutunud röntgenuuringuga, mis aitab arstil diagnoosida haigust või tuvastada trauma iseloomu. Palju harvem kasutatakse diagnostikas radionukliidide manustamist patsiendile, et väljaspool keha asuvate andurite abil teha kindlaks, kuidas elundid töötavad. Kui muul viisil pole võimalik diagnoosi määrata kasutavad arstid mõlemat tüüpi protseduure.

Kiirgusdoosid on tavaliselt väikesed, ehkki teatud protseduurides võivad need olla üsna suured. Palju suuremaid doose on vaja kasutada eluohtlike haiguste või elundite talitushäirete raviks, vahel kombineeritakse kiiritamist teiste ravivõtetega. Haiget kehaosa võib mõjutada radioaktiivse kiirega või patsiendile manustada üsna kõrge aktiivsusega radionukliide.

Röntgenkiirte kasutamist patsientide uurimiseks nimetatakse röntgendiagnostikaks ja diagnoosiks või teraapiaks ette nähtud radionukliide sisaldavate medikamentide kasutamist nimetatakse tuumameditsiiniks. Protseduure, kus patsientide raviks kasutatakse kiiritamist, nimetatakse kiiritusraviks.

Kiirgusdoosid meditsiinilises diagnostikas

Elanike arv arsti kohta	*Uuringute arv aastas 1000 inimese kohta*	*Aasta keskmine efektiivdoos, mSv*
< 1000	920	1.2
1000-3000	150	0.14
3000-10 000	20	0.02
> 10 000	< 20	0.02
Maailma keskmine	330	0.4

Tabel 2 UNSCEARi 2000. aasta aruandest ÜRO peaassambleele

Käe esimene röntgenpilt (proua Röntgen)



Röntgendiagnostika

Tavalises röntgenuuringus läbib seadmest tulev kiirgus patsiendi keha. Röntgenkiired läbivad lihaseid ja luid erinevalt ning tekitavad keha siseehituse kujutise fotofilmile. Sageli on võimalik kujutist jäädvustada ja töödelda ka elektrooniliselt. Nende kujutiste abil saadava info väärtus selgitab, miks arenenud maades teevad arstid aastas inimese kohta vähemalt ühe röntgendiagnostika.



Kehaosad, mida kõige sagedamini uuritakse, on rindkere, jäsemed ja hambad, millest igaüks eraldi võetuna moodustab uuringute kogusummast 25 protsenti. Doosid on üsna väikesed – näiteks umbes 0,1 mSv rindkere uuringu korral. Muude uuringute – nagu selgroo alaosa – efektiivdoosid on suuremad, sest kiirguse suhtes tundlikumad elundid ja koed saavad seda rohkem. Soolestiku alaosa uurimisel, kus kasutatakse baariumklistiiri, on efektiivdoos märkimisväärselt suur, umbes 6 mSv, kuid sellised uuringud moodustavad kogusummast ainult ligikaudu ühe protsendi.

Patsientide tüüpilised doosid tavalises röntgendiagnostikas ja kompuutertomograafia uuringus

UNSCEARi 2000. aasta aruandest ÜRO peaassambleele, Lisa D, köide 1, tabelid 15 ja 19

Uuring	*Tavaline röntgenkiirguse doos (mSv)*	*Kompuutertomograafia doos (mSv)*
Pea	0.07	2
Hambad	< 0.1	–
Rindkere	0.1	10
Kõht	0.5	10
Vaagnapiirkond	0.8	10
Selgroo alaosa	2	5
Soolestiku alaosa	6	–
Jäsemed ja liigesed	0.06	–

KT skaneerimine

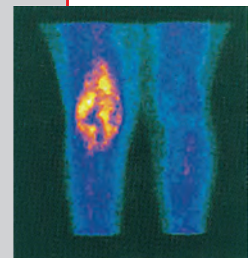


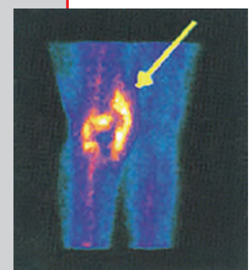
Kompuutertomograafia (KT) kasutamine on viimastel aastatel oluliselt sagenenud ja jõudnud tasemele, kus arenenud riikides moodustavad KT skaneeringud umbes 5 protsenti kõikidest kiirgusdiagnostika protseduuridest. Selle meetodi puhul pöörleb lehvikukujuline röntgenkiirte kimp ümber patsiendi ja registreeritakse vastasküljel asuva andurite rea poolt. Arvuti koostab patsiendist lõigu- või sektorikujulise läbiva kujutise, mis võimaldab saada kõrgetasemelist diagnostilist informatsiooni. Siiski tuleb arvestada, et KT puhul võivad doosid olla suurusjärgu võrra või veelgi suuremad kui tavalises röntgendiagnostikas.

KT uuringud suurendavad oluliselt meditsiinilise diagnostika käigus saadud kollektiivdoosi ja mõnes riigis ulatub see kuni 40 protsendini kogudoosist. Soolestiku alaosa uurimine annab 10 protsenti kogu kollektiivdoosist ja rindkere uurimine umbes ühe protsendi. Need arvud näitavad selgelt, et mõned suhteliselt harva kasutatavad protseduurid võivad anda elanikkonnale kaugelt suurema doosi kui tavalisemad uuringud. Seepärast KT ei kasutata, kui tavalisest röntgenuuringust piisab diagnoosi määramiseks.

Diagnostilised protseduurid, mille käigus saadakse kõige suuremaid doose, on siiski sekkuva radioloogia protseduurid. See tähendab, et arst viib protseduuri läbi patsiendi kehas, rakendades röntgenkiiritamist seeriaviisiliselt, et „vaadata patsiendi sisse“ reaalajas. See võimaldab siseelundite puhul viia protseduuri läbi ilma kirurgilise operatsioonita, mis oleks muidu ainus võimalus elundi juurde pääsemiseks. Peab aga märkima, et selliste protseduuride käigus võivad patsiendid saada doose vahemikus 10-100 mSv ja kui ei rakendata hoolikat abivahendeid või kontrolli, võivad sama suuri doose saada ka kirurgid. Mõnel taolisel juhul on protseduuride doosid olnud piisavalt kõrged, et kutsuda nii patsientidel kui kirurgidel esile deterministlikke tagajärgi.

Parema põlve proteesiga ja põletiku tunnustega (nool) patsiendi tehneetsium-99m stsintigramm





Tuumameditsiin

Tuumameditsiini diagnostilise protseduuri korral antakse patsiendile radionukliide sisaldavat ainet ehk medikamenti, mida uuritav kude või organ omandab eelisjärjekorras. Medikamenti manustatakse süstimise, allaneelamise või sissehingamise teel. Manustatav radionukliid eraldab gammakiiri.

Enamasti kasutatakse diagnostilistes protseduurides radionukliidi tehneetsium-99m, mille poolestusaeg on 6 tundi ja eraldatavate gammakiirte energia 0,14 MeV. Seda radionukliidi on haiglas lihtne valmistada ning ta seondub kergesti mitmesuguste kandeainetega. Selleks, et uurida, kuidas elundid ja koed käituvad ja kui kiiresti radionukliid liigub, on vaja eriandurit.

Tehneetsiumi uuringutel saadud individuaaldoosid on võrreldavad kiirgusdiagnostika doosidega. Tuumameditsiini kollektiivdoos on siiski rohkem kui suurusjärgu võrra madalam, sest protseduuride arv on palju väiksem.

Tavaliste tuumameditsiini elundiuuringute käigus saadud tüüpilised patsiendidoosid

UNSCEARi 2000. aasta aruandest ÜRO peaassambleele, köide 1, lisa D, tabel 42

Skaneeritud organ	*Efektiivdoos (mSv)*
Aju	7
Luu	4
Kilpnääre, kops	1
Maks, neer	1

Kui radionukliide kasutatakse pigem raviks kui diagnoosimiseks, puutub patsient kokku palju suurema aktiivsusega ja sihtkoed või elundid saavad palju kõrgemaid doose. Kilpnäärme ületalitluse – hüpertüroiismi ravi on arvatavasti kõige levinum raviprotseduur, milles kasutatakse radionukliidi jood-131. Ehkki selistes protseduurides kasutatavatel radionukliididel on lühike poolestusaeg, peavad meedikud arvestama sellega, et aktiivsus jääb radionukliide saanud patsiendi kehasse ka mõneks ajaks pärast protseduuri lõppu. Eriti peab seda arvestama pärast raviprotseduuri, kui on vaja otsustada, kas patsiendi võib haiglast välja lubada. Mõnikord on vajalik teavitada ka patsiendi perekonda ja sõpru, et nad võtaksid kasutusele kaitseabinõud jääkaktiivsusest tingitud juhusliku kiirguse vältimiseks.

Kiiritusravi



Kiiritusravi kasutatakse vähi raviks või vähemalt kõige piinavamate sümptomite leevendamiseks, tappes kiirgusega vähirakke. Kõrge energiaga röntgenkiirte kimp, gammakiired või elektronid, suunatakse haigele koele, põhjustades suur doos ning samal ajal säästes ümbritsevat tervet kude. Kui kasvaja asub sügaval kehas, suunatakse kiirtekimp sellele mitmest suunast, et vältida juhuslikku kahjustust. Teine ravivõte, mida mõne vähi puhul kasutatakse, on *brahhüteraapia*. Kuna kiiritusravi doosid on kõrged, kasutatakse seda vaid juhul, kui paranemisväljavaade on hea ja teised meetodid ei annaks nii tõhusat tulemust.

Ehkki kiiritusravi võib esialgse vähi välja ravida, võib see ka tekitada vähki teistes kudedes või kahjulikke pärilikke mõjusid järgmistes põlvkondades. Siiski on enamik kiirgusravi saavatest inimestest laste soetamise east väljas ja liiga vanad, et hiljem avalduvad vähid saaksid tekkida. Niisiis on kiiritusravi eesmärk maksimeerida ravi tõhusust ja samal ajal minimeerida kahjulikke kõrvalmõjusid.

Kasvajate puhul on vajalik kasutada kümnete greide suurusi doose, et tulemuslikult vähirakke tappa. Kudedele määratud doosid on tavaliselt vahemikus 20– 60 Gy. Ravi tuleb väga hoolikalt ja täpselt planeerida – liiga suurte või väikeste dooside tagajärjeks võib olla puudulik ravi või soovimatud kõrvalmõjud. Seadmete ülespanekul ja kasutamisel on vaja rangelt jälgida nõuetekohase kvaliteedi tagamist. Kui seda ei tehta, võivad tagajärjed olla tõsised: 1996. aastal Costa Ricas sai valesti kalibreeritud kiirgusteraapia tagajärjel üle 100 patsiendi kõrgemaid doose kui vaja, mis lõppes paljudel juhtudel surma või raske vigastusega. 2001. aastal avastati Panamas, et häired andmete sisestamisel ravi planeerimissüsteemi viisid 28 patsiendi ülekiiritamiseni, põhjustades mitme inimese surma.

Meditsiinikiirituse juhendtasemed

Kiirgusdiagnostika laialdase kasutuse ja suurte kollektiivdooside tõttu on oluline vältida mittevajalikke kokkupuuteid kiirgusega ja hoida vajalikest protseduuridest saadavad doosid nii madalal kui võimalik. Röntgenuuringule saatmise otsus on meditsiinilise põhjenduse küsimus, pidades silmas patsiendi huve. Patsiendi doos peaks olema võimalikult väike, kuid siiski piisav täpse diagnoosi määramiseks. Eriti hoolikad peaksid arstid olema lastega tehtavate uuringute dooside minimeerimisel.

Dooside minimeerimise meetodid hõlmavad nii heas korras, hooldatud ja täpselt seadistatud seadmete oskuslikku kasutamist, kui ka kvaliteedi tagamise programmi olemasolu röntgenoloogia osakonnas. Sarnaste röntgenuuringute doosid võivad varieeruda, sest patsiendid on erineva suuruse ja kujuga, kuid üldiselt peaksid saadavad doosid jääma allapoole kokkulepitud tasemest. Seda nimetatakse, nagu mainisime peatükis 6, referents- või juhenddoosiks. Meditsiinikiirituse dooside, doosikiirguste ja aktiivsuse juhendtasemed annab BSS.

Uuring		*Sisenddoos radiograafi kohta (mGy)*
Nimmeaju	AP	10
Rindkere	PA	0.4
Kolp	PA	5

Märkus: PA – tagumine-eesmine AP - eesmine-tagumine projektsioon

IAEA dooside juhendtasemed diagnostilises radiograafias tüüpilisele täiskasvanud patsiendile

Allikas: Rahvusvahelised põhilised ohutusnormid kaitseks ioniseeriva kiirguse eest ja kiirgusallikate ohutuse tagamiseks (1996), Skeem III, lk 279

Kogudoosid

Kuna läbiviidavate röntgendiagnostika protseduuride arv on suur, eriti arenenud maades, on selle tagajärjel saadav kollektiivdoos üsnagi suur. UNSCEARi hinnangul on kõikidest diagnostika-protseduuridest saadud kollektiivne doos 2500 miljonit inimsiivertit. Noored inimesed ei vaja kiirgusprotseduure sagedasti ja uuringu vajaduse tõenäosus kasvab üldiselt vanuse suurenemisega. See viitab üldiselt ka sellele, et kiirituse tagajärjel vähi tekkimise tõenäosus on madal.

Kiirguse levinud kasutusalad tööstuses

Sulamite ja ühenduste radiograafia

Kottide ja pakkide turvakontroll

Konteinerite täituvuse mõõtmine

Teatud meditsiinilise varustuse steriliseerimine

Staatikanähtuste kõrvaldamine paberitööstuses

Üksikesemete kvaliteedikontroll

Peatükk 9 **Kutsekiiritus**

Ioniseeriva kiirgusega puututakse kokku paljudel kutsealadel. Tehislikke kiirgusallikaid kasutatakse tavaliselt töötlevas tööstuses ja teeninduses, riigikaitsega seotud aladel, uurimisinstituutides ja ülikoolides ning loomulikult tuumaenergeetikas. Ja nagu nähtus peatükist 8, kasutatakse tehispäritoluga kiirgust ulatuslikult meditsiinis ja tervishoius.

Mõned töötajad puutuvad kokku ka loodusliku kiirgusega ning teatud juhtudel võib see vajada ka järelevalvet ja kaitset. See kehtib eelkõige radooni kohta kaevandustes, kuid ka asustuspiirkondades, kus radooni tasemed on kõrged. Suhteliselt suurte doosikiirustega on tegemist ka lennureisimise puhul, kuna lennukõrgustel on kosmilise kiirguse tase kõrgem ja osa spetsialiste peab vajalikuks ka lennukimeeskondade regulaarset kontrollimist, ehkki pole selge, millisel määral on nende kokkupuudet kiirgusega võimalik vähendada.

Paljud kiirgustöötajad kannavad spetsiaalseid seirevahendeid (või dosimeetreid) nagu spetsiaalsesse hoidjasse paigutatud fotofilm või mõni termoluminestseeruv materjal. Üha rohkem kasutatakse selleks ka elektroonilisi seadmeid, mis registreerivad inimese sattumise välisallikatest lähtuva kiirguse mõjualasse, kiirguse määra ning arvutavad vahendi kandja doosi suuruse.

Juhul kui töökoha õhus võib esineda ükskõik kas looduslikke või tehislikke radioaktiivseid osakesi, on kõige otstarbekam võtta sissehingatava õhu proov, see mõõta ja määrata sisedoos. Mõnel juhul on võimalik mõõta ekskreetide aktiivsus ja sellest teha järeldused saadud doosi kohta või mõõta tundlike anduritega otseselt aktiivsust kehas. Igal juhul on eesmärgiks doosi võimalikult täpne hindamine.



Tööstuslik radiograaf TLD loenduriga



Filmi- ja TLD dosimeetrid

Aasta keskmine efektiivdoos erinevatel kutsealadel (UNSCEAR)

Andmed aastate 1990–1994 kohta Allikas: UNSCEAR 2000. aasta raport, kd 1, lisa E, tabelid 12, 16, 22 ja 43

Allikas	***Doos (mSv)***
Tehisallikad	
Tuumatööstus	
Uraani kaevandamine	4.5
Uraani peenestamine	3.3
Rikastamine	0.1
Kütuse tootmine	1.0
Tuumareaktorid	1.4
Tuumakütuse töötlemine	1.5
Meditsiinikiirgus	
Radioloogia	0.5
Hambaravi	0.06
Tuumameditsiin	0.8
Kiiritusravi	0.6
Tööstuslikud allikad	
Kiiritamine	0.1
Radiograafia	1.6
Isotoopide tootmine	1.9
Puuraukude rajamine	0.4
Kiirendid	0.8
Lumineerimine	0.4
Looduslikud allikad	
Radooni allikad	
Söekaevandused	0.7
Metallikaevandused	2.7
Rajatised maapinna kohal (radoon)	4.8
Kosmilised allikad	
Tsiviillennukite lennumeeskond	3.0

Tehisallikad

Kogu maailma tuumatöötustes töötab umbes 800 000 inimest ja üle 2 miljoni inimese puutub kokku meditsiinikiiritusega. UNSCEAR on kogunud andmeid kiirgustöötajate dooside kohta, võttes arvesse eelnimetatud ja ka teised töötajad, näiteks tööstusradiograafid. Tuumatööstuse kollektiivdoos on umbes 1400 inimsiivertit, samas kui meditsiini kiirgustöötajatel on see 800 inimsiivertit. Tööstuses kasutatava kiirgusega puutub kokku vähem inimesi, seepärast on ka kollektiivdoos umbes 400 inimsiiverti võrra väiksem. Samas saavad sellised töötajad mõnes riigis kõige kõrgemaid individuaaldoose.

Üldine keskmine tehisallikatest põhjustatav kutsekiirguse doos jääb alla 1 mSv aastas. Tuumatööstuse keskmine doos on sellest pisut kõrgem ja meditsiinitöötajate keskmine doos mõnevõrra madalam. Viimase aastakümne jooksul on doosid tänu ICRP ja BSS soovituste laialdasele rakendamisele märgatavalt langenud. Kui erandlik mäetööstus välja arvata, on keskmised tehisallikatest lähtuva kutsekiirguse doosid enamuse tegevusalade puhul, tuumatööstus kaasa arvatud, praegusel ajal umbes alla 2 mSv aastas.

Tervishoiuga seotud kutsealadel – meditsiinis, hambaravis ja veterinaarias – on doosid üldiselt väga väikesed, kuid ka need annavad põhjust muretsemiseks. Mõnede kliiniliste röntgendiagnostika protseduuride puhul peavad arstid protseduuri jooksul viibima patsiendi juures ja riskivad saada märkimisväärseid kiirgusdoose. Veterinaarias ei ole röntgenseadmed ja protseduurid sageli nõuetele vastavad.

Looduslikud allikad

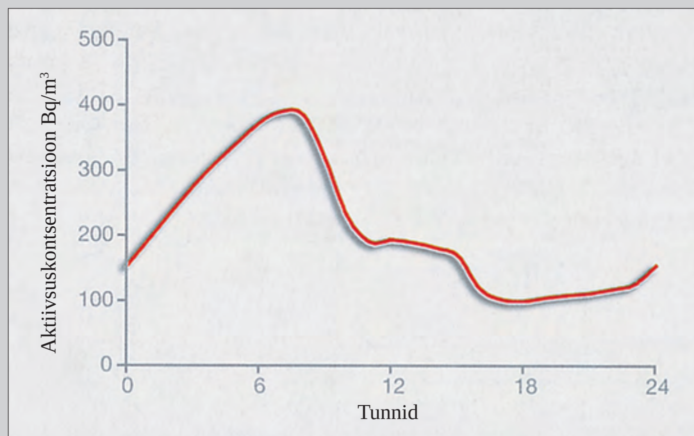


Ka looduslikud allikad võivad põhjustada kutsekiiritust. Sellisteks töökohtadeks on peamiselt kaevandused, ehitised ja lennukid. Kiirituse tõttu on allutatud regulaarsele läbivaatusele peaaegu 4 miljonit söekaevurit. Vähem inimesi (umbes miljon üle kogu maailma) töötab muudes kaevandustes ja töötleb selliseid maake, mille loodusliku aktiivsuse tasemed on märgatavalt üle keskmise. Ka nende töötajate poolt saadavaid doose jälgitakse regulaarselt.

Radooni tasemed – ja doosid – on söekaevandustes madalad, selle tagab hea ventilatsioon. Väheste kaevurite doosid ületavad 15 mSv aastas, enamus jäävad sellest väiksemaks. Ventilatsioon metalli- ja muudes kaevandustes ei ole alati nii rahuldav ning sellest tingituna on ka keskmine doos palju kõrgem ning teatud osa töötajaid võib saada palju suuremaid doose.

Filmdosimeetrit kandev meditsiinitöötaja

Umbes viiendik inimestest, kes teadaolevalt puutuvad töö tõttu kokku suurema loodusliku kiirgusega, töötavad kauplustes, büroodes, koolides ja teistes radoonirohkete piirkondade hoonetes. Nendel aladel on keskmine doos kõrge, ulatudes kuni 5 mSv, mis on kõrgem kui paljudel kiirgustegevusega seotud töökohtadel. Tuleks siiski meeles pidada, et see rühm on ebatavaline – ei ole moodustunud samal erialal töötavatest inimestest, pigem on olnud valiku aluseks saadavad doosid. Radooni tasemed varieeruvad sõltuvalt hoonete kütmise ja ventileerimise viisist päevade lõikes märgatavalt, nii et õhus radooni sisalduse lühiajaline mõõtmine võib olla eksitav. Parim viis radooni taseme vähendamiseks töökohtades on sama, mis elamutes – alandada õhurõhku põranda all.



Siseruumides esineva radooni kontsentratsiooni kõikumine elamus

Lennumeeskonna doosid, mida põhjustab kosmiline kiirgus, sõltuvad marsruutidest ja lennuaegadest. Keskmine aastadoos on umbes 3 mSv, kuid see võib tõusta kuni kaks korda, kui on tegemist pikkade ning suurtel kõrgustel toimuvate lendudega. Kiirguse ja töö iseloomu tõttu on need doosid vältimatud.

Efektiivdoosid lennureisil

Allikas: Kosmilise kiirguse põhjustatavad doosid lennumeeskonna liikmetele. EURADOSe 5. töörühma aruanne Euratomi asutamislepingu artikkel 31 alusel loodud ekspertrühmale

Linnad	***Efektiivdoos (μSv)***
Vancouver ã Honolulu	14.2
Frankfurt ã Dakar	16.0
Madrid ã Johannesburg	17.7
Madrid ã Santiago de Chile	27.5
Kopenhaagen ã Bangkok	30.2
Montreal ã London	47.8
Helsingi ã New York	49.7
Frankfurt ã Fairbanks, Alaska	50.8
London ã Tokio	67.0
Pariis ã San Francisco	84.9

Kogudoosid

Ioniseerivast kiirgusest saadud kutsekiirituse kollektiivne efektiivdoos maailmas on umbes 14 000 inimsiivertit aastas. Teatud tööstusharude töötajad võivad mõnel aastal saada mõne mSv kiiritust. Veidi üle 80 protsendi sellest kollektiivdoosist lähtub kõrgendatud looduslikest allikatest, vähem kui 20 protsenti on pärit inimese loodud allikatest. Tehisallikatega tegelevate töötajate keskmine aastane doos kogu maailmas on 0,6 mSv ja looduslike allikatega kokku puutuvatel töölistel 1,8 mSv. Kui jaotada see kogu elanikkonnale, siis tuleb arvestuslikuks aastadoosiks umbes 0,002 mSv, mis on suhteliselt väike lisa kõikidest muudest allikatest saadud doosi üldisele väärtusele 2,8 mSv.

Peatükk 10 **Keskkonnareostus**

Peatükist 7 ilmnes, et looduslikud radionukliidid esinevad kõikjal keskkonnas. Käesolev peatükk käsitleb tehisliku tekkega radionukliide, mille ulatuslikku levikut põhjustavad sellised tegevused nagu tuumarelvade katsetused atmosfääris, Tšernobõli katastroof ning radioaktiivsete jäätmete vabastamine keskkonda tuuma- ja muudest rajatistest. Need radionukliidid satuvad õhust ja veest pinnasesse ning toiduainetesse ja võivad erineval moel mõjutada ka inimest.



Inimese kokkupuude kiirgusega radionukliidide keskkonda vabastamisel

Vihm „peseb" radioaktiivsed materjalid õhust välja

Väliskiirgus otse pilvest

Välisdoos pinnale sadenenud radioaktiivsetest materjalidest

Sisedoos toiduainetes olevate radioaktiivsete ainete söömisest ja joomisest

Sisedoos joogivee tarbimisest

Tuumarelvade katsetused

Kui tuumarelvi katsetatakse maapinna kohal, paisatakse atmosfääri ülakihtidesse erinevaid radionukliide alates vesinik-3 (triitium) kuni plutoonium-241. Sealt liiguvad radionukliidid aeglaselt atmosfääri alakihtidesse ja edasi maapinnale. Enne katsetuste piiramise keelustamise lepingu vastuvõtmist 1963. aastal pandi atmosfääris toime umbes 500 plahvatust ja pärast seda 1980. aastani veel mõned. Praegu on radionukliidide kontsentratsioon õhus, vihmas ja inimtoidus palju madalam kui 1960. aastate väärtused.

Maailmas on praegu inimesele olulise kiirituse seisukohalt tähtsaimad katsetuste käigus tekkinud radionukliidid süsinik-14, strontsium-90 ja tseesium-137. Nende väikesed kogused satuvad kehasse toidu ja joogiga. Kuna neid radionukliide on sadenenud ka pinnasele, kust osaliselt on nad liikunud pinnasesse, siis nende radionukliidide jääkaktiivsus põhjustab samuti inimesele mõningat kiirgust.

Sise- ja väliskiirgus tõstavad võrdselt maailma keskmist efektiivdoosi 0,005 mSv võrra aastas. Seda tuleks võrrelda järsu tõusuga kuni 0,1 mSv 1963. aastal. Määratletud on mõned inimrühmad, kes saavad globaalsest radioaktiivsest tolmust märgatavalt kõrgemaid doose. Näiteks avastati 1960. aastatel, et Põhja-Euroopa ja Kanada põhjapõdrakarjused saavad oluliselt kõrgemaid doose kui ülejäänud inimesed, sest nad söövad samblikust – mis on väga tõhus õhust tseesium-137 koguja – toituvate loomade liha. Eeldades, et maailma elanikkond on 6 miljardit inimest, siis hinnatakse tuumarelvakatsetustes tekkinud radioaktiivsest tolmust saadud globaalne kollektiivdoos on umbes 30 000 inimsiivertit aastas.

Koht, riik, (katsetaja riik, kui erineb)	***Tuumarelva-katsetuse tüüp***	***Kõrgeim isikudoos kohalikele elanikele testi ajal (mSv)***	***Kollektiivdoos (inimSv)***
Nevada, USA	Atmosfääri ja maa-alused	60–90	470
Bikini ja Enewetak, Marshalli saared (USA)	Atmosfääri	1100–6000	160
Semipalatinsk, Kasahhi (NSVL)	Atmosfääri ja maa-alused	2000–4000	4600–11 000
Novaja Zemlja (NSVL)	Atmosfääri	madal	madal
Maralinga ja Emu, Austraalia (ÜK)	Atmosfääri	1	700
Jõulusaar, Austraalia (ÜK)	Atmosfääri	madal	madal
Reganne, Alžeeria (Prantsusmaa)	Atmosfääri	teadmata	teadmata
Lop Nor, Hiina	Atmosfääri	0.1	teadmata
Mururoa ja Fangataufa, Prantsuse Polüneesia (Prantsusmaa)	Atmosfääri ja maa-alused	1–5	70

IAEA on lisaks tuumarelvade atmosfäärikatsetustes tekkinud laialdase levikuga radionukliididest põhjustatud dooside väljaselgitamisele paljude aastate vältel läbi viinud ka uuringuid atmosfääris tehtud ja maa-aluste relvakatsetuste pikemaajaliste kohalike mõjude kohta. Nende uuringute tulemused on kokku võetud ülal asuvas tabelis, kus on välja arvestatud ka maksimaalsed aasta kiirgusdoosid, mida inimesed saaksid, kui nad neid alasid praegu asustaksid. Vaikse ookeani lõunaosa inimtühjadel Mururoa ja Fangataufa atollidel, kus suurem osa katsetustest viidi läbi maa all, ei ületaks doos praegu 0,25 mSv, isegi kui atollid oleksid asustatud. Samuti Vaikses ookeanis paikneval Bikini saarel ulatuksid potentsiaalsed doosid 15 mSv, kuid kasutusele on võetud taastusmeetmed, et seda näitajat umbes 90 protsendi võrra vähendada, enne kui saare elanikud naasevad.



Semipalatinski tuumakatsetuste jääknähud: vaatetorn, mis ehitati katsete jälgimiseks

Semipalatinskis Kasahstanis, kus viidi läbi umbes 100 atmosfäärikatsetust, näitab esmane hinnang, et maksimaalne aastadoos võib ulatuda 140 mSv, kui inimesed elaksid kõige tugevamini saastatud aladel. Seda keegi praegu ei tee, kuid selliste võimalike kõrgete dooside korral on vaja kas saaste kõrvaldada või vältida inimeste viibimist kõige saastatumates piirkondades pikemat aega. Rahvusvaheliselt – kaasatud on mitmed ÜRO organisatsioonid – tehakse pingutusi, et Semipalatinski piirkonna inimeste elamistingimusi parandada. Radioaktiivne saaste katsetuspaigal on vaid üks probleemidest, kuid sellega on vaja tegelda.



Kaevandus-eksperimendi käigus toimunud tuumaplahvatuse tagajärjel tekkinud järv.
V. Mouchkin/IAEA

Tšernobõli katastroof

Tuumareaktori plahvatus Tšernobõli aatomielektrijaamas 26. aprillil 1986 põhjustas radionukliidide pihkumise keskkonda suurtes kogustes kümne päeva jooksul. Õhu kaudu levis õnnetuspaigalt Ukrainas radioaktiivne materjal kogu Euroopasse. Saastepilv liikus Euroopasse ja kaugemalegi, kuid sadenemise määrasid valdavalt kohalikud ilmastikutingimused. Vihm põhjustas mõnes piirkonnas suurema radionukliidide sadenemise kui teistes.

Kohalikul tasandil oli õnnetus katastroofi mõõtmetega ja päästetöötajate kokkupuude tugeva kiirgusega lõppes 31 inimese, sealhulgas 28 tuletõrjuja surmaga. Tuletõrjujad said sadestunud radionukliididest suuri välisdoose – vahemikus 3-16 Sv. Naha saastumine peamiselt beetakiirgust eraldavate radionukliididega põhjustas raskekujulist erüteemini. 209 inimest paigutati haiglasse, neist 106 diagnoositi äge kiiritushaigus. Õnneks nad paranesid ja võisid mõne nädala või kuu pärast haiglast lahkuda.

Peamised radionukliidid, mis põhjustasid doose nii lähikonnas kui ka kaugemal asuvatele inimestele, olid jood-131, tseesium-134 ja tseesium-137. Peamise osa doosist moodustas pinnases asuvate radionukliidide väliskiiritus, jood-131 sissehingamisest (sadestus kilpnäärmesse) ja toiduainetes sisalduvatest radionukliidiest põhjustatud sisekiiritus.



Õhuproovi võtja



Tšernobõli tuumaelektrijaam V. Mouchkin/IAEA

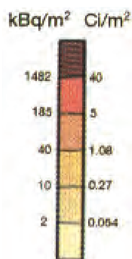
Pärast avariid evakueeriti oma kodudest praeguses Valgevenes, Ukrainas ja Vene Föderatsioonis rohkem kui 100 000 inimest ning pinnasesse sattunud radioaktiivsete materjalide tõttu kuulutati mitmed alad „kinnisteks“. Tšernobõli reaktori juures algatati ulatuslik puhastusoperatsioon, kuhu kaasati 750 000 inimest. Saaste puhastamisega tegelevaid inimesi hakati kutsuma likvideerijateks ja mõned neist said doose, mis ületasid ICRP doosi piirmäära 50 mSv. Selline kiiritus võib olla õigustatud õnnetuse korral. ICRP soovituse kohaselt ei tohiks doos õnnetuste likvideerimisele sarnastes olukordades ületada 500 mSv. Piirmäärade abil välditakse kiirgusest tingitud deterministlikke tagajärgi töölistel. Avaldatud andmete kohaselt jäid esimesel aastal pärast õnnetust keskmised doosid alla 165 mSv. Järgmistel aastatel viidi need järkjärguliselt alla 50 mSv.

UNSCEAR 2000. aasta aruanne ÜRO peaassambleele

Tšernobõli ümbruse elanike seas ja ka muudes piirkondades viidi läbi põhjalikud uuringud, et avastada võimalikke mõjusid tervisele. Seni on suurima mõjuna tuvastatud kilpnäärme vähi juhtumid Valgevene ja Ukraina lastel. Jood-131 sattus nende organismi eelkõige joodiga reostatud piima juues. Jood-131 on lühiealine radionukliid (poolestusaeg 8 päeva), mis kontsentreerub kilpnäärmes. Erinevaid andmeid kasutades on olnud võimalik hinnata selle tervisemõjuri riskifaktoreid lastel. 2000. aastal avaldas UNSCEAR ülevaate Tšernobõli avarii tagajärgedest. Selles toodud teaduslike hinnangute alusel võib väita, et õnnetuse ajal kiiritust saanud laste seas oli umbes 1800 kilpnäärme vähi juhtumit. Ehkki tegemist on raske haigusega, ei ole selle tagajärjeks tavaliselt siiski surm.



Tseesium-137 levik pärast Tšernobõli avariid



Andmed puuduvad

Pealinn



UNSCEAR pole leidnud õnnetuse toimumisest käesoleva ajani teaduslikke tõendeid teiste tervisehäirete esinemise sagenemise kohta, mida oleks võimalik seostada kiirgusega. See ei tähenda, et teised mõjud puuduksid – kõige rohkem kiiritust saanud indiviididel on suurem risk kiiritusest tulenevate tagajärgede avaldumiseks tulevikus, kuid UNSCEAR järeldas, et enamikul elanikkonnast ei ole tervisekahjustusi, mis oleksid seotud õnnetuse käigus saadud kiiritusega. Muud tõsised tervislikud mõjud, mis kohalikul elanikkonnal ilmnesid, olid seostatavad õnnetusest põhjustatud stressi ja kartusega, kaasa arvatud hirm kiirituse ees.

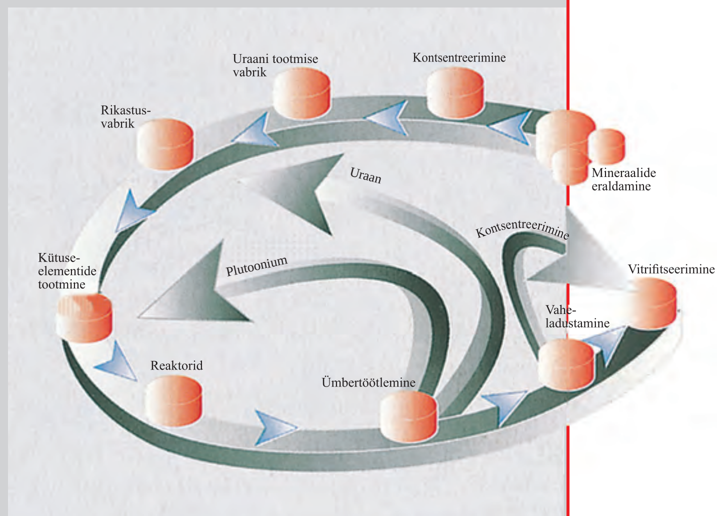
Ehkki need nähud on erinevad võrreldes eespool kirjeldatud kilpnäärme haigustega, pole nad vähem reaalsed ning ilmnesid üle kogu Euroopa aladel, kuhu sadenes radioaktiivset saastet. Näiteks Skandinaavias saadi õnnetuse esimeste nädalate jooksul umbes 0,1 mSv suurusi doose ning paljud inimesed kurtsid oma arstile iiveldusnähtusi, peavalu, kõhulahtisust ja mõnel juhul naha punetust. Sajandi vältel tehtud kiirguse mõjude teaduslike uuringute tulemuste alusel võib väita, et nii madalad doosid ei saa tekitada kirjeldatud otseseid tagajärgi. Ilmselt avaldub osa inimeste tugev hirm kiirguse ees täiesti reaalsete sümptomitena ja see oli üks Tšernobõli õppetundidest.

Radioaktiivsed heitmed

Tehisliku päritoluga radionukliidid satuvad keskkonda tuumaenergeetikatööstusest, militaarrajatistest, uurimisasutustest ning ka haiglatest ja tööstusest. Vähegi olulisemate heitmete üle tuleks rakendada seadusega ette nähtud kontrolli, see tähendab, et nende vabastamine peaks toimuma vaid loa alusel ja järelevalve all.

Tuumakütuse tsükkel: kütuse valmistamine, reaktori töötamine, kütuse töötlemine ja jäätmekäitlus

Radionukliide vabastavate seadmete omanikud või operaatorid peavad rakendama seireprogramme, nagu teevad ka mõned pädevad asutused. Põhiosa aktiivsusest tuleb tuumaenergeetikatööstuse heitmetest. *Tuumakütuse tsükli* igas staadiumis vabastatakse erinevaid radionukliide vedelal, gaasilisel või tahkel kujul. Heitmete iseloom sõltub konkreetsest operatsioonist või protsessist.



Tuumaelektrijaamade reaktorid toodavad igal aastal umbes 20 protsenti maailma elektrienergiast. Tuumaseadmete rutiinse töötamise ajal on radionukliidide heitmed keskkonda väikesed ja kiiritust tuleb arvutada keskkonna ülekandemudelite abil. Kõikide tuumakütuse tsükli operatsioonide – sealhulgas kaevandamine ja peenestamine, kütuse valmistamine, reaktori töötamine ja tuumakütuse töötlemine – kohalikku ja piirkondlikku kiiritust hindab UNSCEAR umbes 0,9 inimsiivertile gigavatt-aasta kohta. Praegu toodetakse maailmas umbes 250 GW tuumaenergiat aastas, mis annab tuumaenergia toodanguaasta kollektiivdoosiks umbes 200 inimsiivertit. Isikudoosid on üldiselt madalad, jäädes alla 1 μSv aastas. Siiski võivad üksikisikud saada kõrgemaid doose sõltuvalt elukohast ja toidust ning sellisel juhul tuleks rakendada doosipiiranguid maksimumväärtusega kuni 300 μSv aastas.

Kui õnnetus on põhjustanud märkimisväärse kohaliku saastuse, võivad kohalikud doosid olla oluliselt kõrgemad kui doosi piirmäärad. Kus on vajalik, seal tuleks rakendada meetmeid vähendamaks inimeste kokkupuudet kiiritusega. Sellise näitena võib tuua keelualad Tšernobõli ümbruses. Sarnaste meetmetega võidakse oluliselt vähendada nii isiku- kui kollektiivdoosi.

Heitmed kütusetöötlusseadmetest tekitavad kõige suuremat kiiritust inimestele, kes söövad kohalikke mereande. Nende aastadoosiks kujuneb kuni 0,14 mSv, põhjustajaks peamiselt aktiniidid. Strontsium-90 ja teiste radionukliidide vabastamine õhku põhjustab isikudoose – kohaliku piima ja köögivilja kasutamisest – alla 0,05 mSv aastas. Gaasiliste heitmete poolt põhjustatud kollektiivdoos, mis tuleneb peamiselt süsinik-14 sisaldusest toiduainetes, on umbes 500 inimsiivertit aastas.

Vedelatest heitmetest põhjustatud doos on umbes 4000 inimsiivertit aastas, peamiseks allikaks tseesium-137 kalades.

Tuumakütusetsükli heitmete aastadoosid

Tsükli osa	***Heitme tüüp***	***Suurimat kiiritust saavad inimesed (mSv)***	***Kollektiivdoosid (inimSv)***
Kütuse valmistamine	Gaas	0.01	350
	Vedelik	0.01	
Reaktori töötamine	Gaas	0.001	380
	Vedelik	0.004	
Kütuse töötlemine	Gaas	0.05	4500
	Vedelik	0.14	

Ehkki keskkonda vabastatavad radioaktiivsed heitmed on tänapäeval enamuses riikides range kontrolli all, ei korraldatud seda minevikus alati nõuetekohaselt. Mõnes külma sõja aegses militaarrajatises võis toimuda jäätmekäitlus viisil, mis on kaasaegse tsiviilrajatise puhul mõeldamatu. Sellise praktika tagajärgede näiteks on Majaki rajatis Tšeljabinski lähistel Vene Föderatsioonis, mille ümbrus ja Tetša jõe alamjooks on väga kõrge saastustasemega ja mõned kohalikud elanikud on saanud kogu elu jooksul väga kõrgeid doose (kuni 1 Sv või rohkem).

Vaesustatud uraan



Vaesustatud uraani (VU) sisaldavat laskemoona kasutati Lahesõjas 1991. aastal ja 1990. aastate Jugoslaavia lagunemisega kaasnenud relvakonfliktides. Kuigi sõjaväelaste kahjustuste riske lahinguväljal tuleks vaadelda teiste iseenesest mõistetavate riskide taustal, siis vaesustatud uraani kasutamine suurtükiväe poolt tõstatas probleemi aastaid pärast konflikti lõppu avalduvatest mõjudest nii suurtükiväe isikkoosseisu kui elanikkonna tervisele.

Uraan esineb looduses, nagu juba eespool kirjeldatud. See on laialt levinud maakoores, aga ka mage- ja merevees. Seetõttu mõjutavad uraani isotoobid ja nende lagunemisproduktid meid kõiki ning sõltuvalt kohalikest tingimustest varieeruvad saadud doosid suures ulatuses. VU tekib kõrvalproduktina uraani kütusetsüklis, kus looduslikku uraani rikastatakse, et saada sobiv kütus tuumaenergia tootmiseks. Suur osa uraani isotoopide lagunemissaadustest eemaldatakse uraani rikastamisprotsessis.

Vaesustatud uraan on laskemoonas kontsentreeritud metalli vormis ja mure kasutatud laskemoonast tuleneva kiirgustaseme tõusu pärast keskkonnas on arusaadav. Muret tuleb tunda ka inimeste pärast, kes kasutavad vaesustatud uraanmetalli, mis jäi konfliktidest järele. Vahetult päras VU relva tabamuse saanud tanki sisenenud sõjaväelaste dooside mõõtmine viitas, et auru ja tolmu sissehingamine võib põhjustada doosi suurenemise kuni mõnikümmend mSv. Inimeste puhul, kes puutusid hiljem samas keskkonnas kokku uuesti õhku tõusnud tolmuga, võis samuti hinnata saadavate dooside suurenemist, kuid tõenäoliselt olid lisadoosid suurusjärgus mõnikümmend µSv. VU metalli otsesel käitlemisel on kontaktdoosid umbes 2,5 mSv/h, peamiselt põhjustab selle beetakiirgus, mis pole läbistav ja mõjutab ainult nahka. Sellegipoolest tuleks VU sisalduva laskemoona kogumist takistada või kui võimalik, täielikult vältida.

Vaesustatud uraani põhjustatud doosid on niisiis reaalsed ja võivad mõnes olukorras sõjaväelaste puhul osutuda üsna kõrgeks. Isikudoosid pärast lahingutegevuse lõppu on ilmselt palju madalamad ja neid peaks olema suhteliselt kerge vältida.

Saastatud alade korraldus

Nagu oleme näinud ja nagu ilmneb ka järgmistes peatükkides toodud näidetest, on maailma eri osades alasid, mis on inimtegevuse tagajärjel radionukliididega saastunud. Saastatuse kõrge taseme korral võib osutuda vajalikuks erinevate meetmete rakendamine, et tagada piirkonna ohutus ning et inimesed saaksid sinna elama asuda või muuks otstarbeks kasutada. Väikeste alade puhul on võimalik saastatud pinnase ja teiste materjalide kõrvaldamine, kuid suurte alade puhul on olukord keerulisem materjali liiga suure koguse tõttu. Inimeste kaitseks võib kasutada veel ka näiteks piirkondade juurdepääsu- või kasutamispiirangud – keelates elamute ehitamise piirkondades, kuhu on maha jäetud hulgaliselt kaevandusjäätmed, mis võivad põhjustada kõrgeid radooni tasemeid.

Karjamaa Semipalatinski katseala lähedal Kasahstanis



Samuti võib kasutada keemilist töötlust, et vähendada aktiivsust, mis võib sattuda pinnasest toitu. Näitena võib tuua "preisi sinise" manustamise lehmadele, keda karjatatakse Tšernobõli piirkonnas – see on kemikaal mis kiirendab tseesiumi väljutamist lehmade organismist, tagades, et see ei satu piima ja liha sisse ning pinnase töötlemise kaaliumiga Bikini saarel, vältimaks tseesiumi liikumist puudesse.

Kogudoosid

Üldiselt ei põhjusta ükski tehisnukliide keskkonda vabastav seade doose, mis oluliselt ületaksid 0,02 mSv aastas ka kõige rohkem kiiritust saavatel inimestel ja mis märgatavalt suurendaksid kollektiivdoosi. Erandiks on mõned militaarrajatised ja teised raamatus kajastatud rajatised. Keskmiselt on tsiviilotstarbelistest rajatistest pärinevate tehisradionukliidide põhjustatav maksimaalne aastane efektiivdoos umbes 0,14 mSv ja aastane kollektiivdoos umbes 5000 inimsiivertit või 0,001 mSv, kui välja arvutada kogu maailma rahvastiku keskmine näitaja.



Peatükk 11 Tuumaenergia

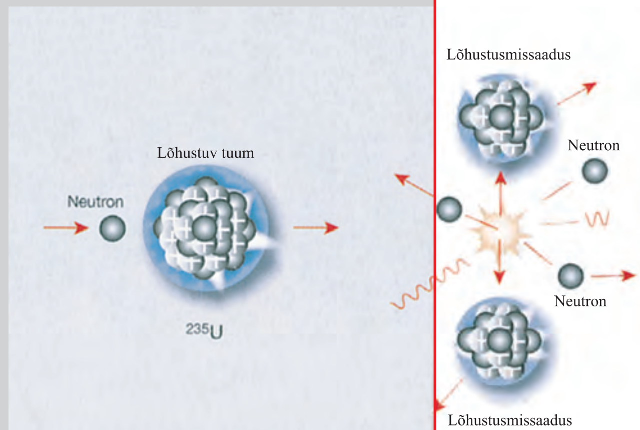
Tuumareaktoreid on kasutatud energia tootmiseks alates 1950. aastatest. 2003. aasta alguses oli 30 riigis kokku 441 töötavat tuumareaktorit planeeritud koguvõimsusega 359 GW.

Tuumareaktorid

Tuumareaktorite töö aluseks on kasutatava kütuse neutronite ja aatomituumade omavaheline reaktsioon. Enamuse reaktorite kütuseks olev uraan koosneb eelkõige kahest isotoobist - uraan-235 ja uraan-238. Looduslikus uraanis, mida kasutatakse vanemates reaktorites, on nende isotoopide vahekord vastavalt 0,7 ja 99,3 kaaluprotsenti. *Rikastatud uraan*, mida valdavalt kasutatakse kaasaegsetes reaktorites, sisaldab umbes 2,5 protsenti uraan-235.

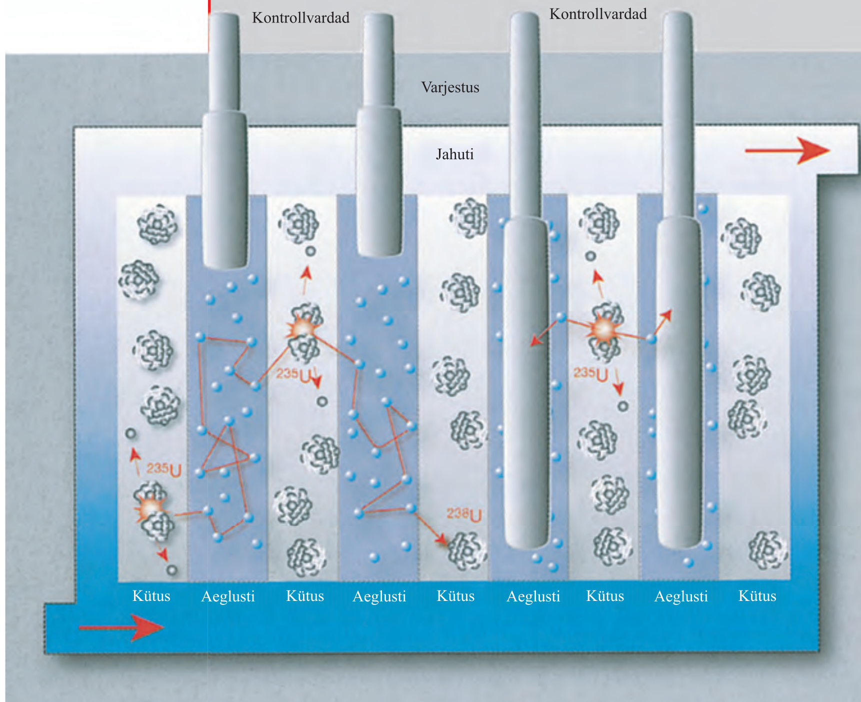
Kui uraan-235 tuum neelab neutroni ja lõhustub, mis tähendab, et ta laguneb kaheks suureks energeetiliseks fragmendiks ehk *lõhustumissaaduseks*, vabaneb energia. Protsessiga kaasneb mitme suure energiaga kiire *neutroni vabanemine* ja mõningane gammakiirgus. Neutroneid aeglustatakse reaktoris selleks, et nad kutsuksid esile uraan-235 lõhustumist. Selliseid neutroneid nimetatakse sageli *soojuslikeks neutroniteks* ja reaktoreid, kus kasutatakse neutronite aeglustamist termoreaktoriteks *soojuslikeks reaktoriteks*. Juhul kui uraan-238 tuum neelab hoopis kiire neutroni, muutub ta uraan-239, mille lõplik lagunemissaadus on plutoonium-239. Ka plutoonium lõhustub või seob neutroneid, moodustades täiendavalt aktiniidide isotoope nagu ameriitsium või küürium. Mõnedes reaktorites üritatakse kasutada kütusena oksiidkütusesegu, mis sisaldab rikastatud uraani, kuhu on segatud kasutatud kütuse töötlemisel saadud plutoonium. Seda käsitatakse kütuse taaskasutusena ja tuumarelvade valmistamiseks sobiva plutooniumi varude kontrolli all hoidmisena. Kütus on tuumareaktoris kogutud seadmesse, mida nimetatakse südamikuks, kus on ka aeglusti (enamasti vesi või grafiit), mis aeglustab neutroneid. Jahuti, tavaliselt vesi või gaas, juhib tekkinud soojuse kütusevarrastest eemale ja tekkinud aur suunatakse soojusvahetajasse. Auru abil pannakse tööle elektrit tootvad turbiinid.

Skemaatiline diagramm uraan-235 lõhustumisest



Kütus on suletud metallkonteineritesse ja reaktori südamik paikneb surveanumas (mõne tehnilise lahenduse puhul on kütuseelemendid paigutatud eraldi surveanumatesse). Massiivne betoonvarjestus aitab kaitsta reaktori südamikust lähtuva intensiivse kiirguse eest. Suuremale osale reaktoritest on ehitatud täiendav kaitsekest (sarkofaag), mis ümbritseb reaktoreid ja tavaliselt ka soojusvahetajaid. Värske kütuse aktiivsus on väga madal ja seda võib käidelda ilma varjestuseta.

Kui aga kütus jõuab reaktorisse, siis kasutamise käigus tema aktiivsus tõuseb. Selle põhjuseks on eelkõige kütuses tekkivad lõhustumissaadused. Sellest tulenevalt võib reaktoriga toimuva avarii korral keskkonda vabaneda märkimisväärsel hulgal radioaktiivset materjali. Pärast reaktorist eemaldamist on kasutatud kütus kõrge temperatuuriga ning sulamise vältimiseks on vaja teda jahutada ja varjestada, et vähendada kokkupuudet kiirgusega.



Tuumareaktori skeem

Ehkki ohutus on kõikide tuumaelektrijaamade puhul keskne teema, on pärast Tšernobõli avariid ja NSV Liidu lagunemist erilist tähelepanu pööratud WWER ja RBMK reaktorite ohutusele. Tänu Ida-Euroopa ja endise NSV Liidu spetsialistide pingutustele, mida on toetatud paljude rahvusvaheliste koostööprojektide kaudu, on nende reaktorite ohutuse kaasajastamisel tehtud väga suuri edusamme.

Levinumad reaktoritüübid on:

Survevee reaktorid (PWR), kuumaveereaktorid (BWR) ja *WWER reaktorid* (nõukogude reaktor, mille ehitus sarnaneb PWR-ga), kõik kasutavad kontroll- ja jahutuselemendina vett.

Raske vee reaktorid nagu Kanadas välja töötatud CANDU reaktorid, mis kasutavad kontroll- ja jahutuselemendina rasket vett (vesi, mille vesiniku aatom on asendatud deuteeriumiga – vesiniku isotoobiga).

Gaasijahutusega reaktorid, mis kasutavad gaasilist süsinikdioksiidi jahutajana ja grafiiti kontrollelemendina.

Vesijahutusega grafiidist kontrollelemendiga RBMK *reaktorid*, mis algselt töötati välja NSV Liidus.

Peatükk 12 Jäätmete käitlemine

Peatükis 10 kirjeldasime tuumakütusetsükli heitmete vabastamist keskkonda, kuid on ka teist liiki radioaktiivsed jäätmed. Lisaks tuumakütusetsükli erinevatele etappidele – kaevandamisest ja uraani töötlemisest vanade tuumarajatiste dekomisjoneerimiseni – tekib radioaktiivseid jäätmeid ka radioaktiivsete materjalide kasutamisel meditsiinis, tööstuses ja teaduses.

Erinevad riigid liigitavad jäätmeid erinevalt, kuid on võimalik eristada teatud üldiseid kategooriaid

Vabastatud jäätmed on radioaktiivsed jäätmed, mille aktiivsus on nii madal, et neid pole vaja käidelda erinevalt tavalistest mitteradioaktiivsetest jäätmetest.

Madala- ja keskmise aktiivsusega radioaktiivsed jäätmed on paber, rõivastus ja laboriseadmed, mida on kasutatud piirkondades, kus käideldi radioaktiivseid aineid, samuti saastunud pinnas ja ehitusmaterjalid. Lisaks kuuluvad siia aktiivsemad materjalid, mida on kasutatud gaasiliste ja vedelate heitmete töötlemiseks enne keskkonda laskmist, või muda, mis koguneb jahutustiikidesse, kus hoitakse kasutatud kütust.

Lühiealised radioaktiivsed jäätmed sisaldavad peamiselt suhteliselt lühikese poolestusajaga (alla 30 aasta) radionukliide ja pikaealisi radionukliide üksnes väga madalas kontsentratsioonis.

NORM (Naturally Occuring Radioactive Material) jäätmed – looduslikku radioaktiivset materjali sisaldavad jäätmed – tekivad sageli väga suurtest kogustes ning sisaldavad üsna madala kontsentratsiooniga looduses esinevaid radionukliide (ehkki nende kontsentratsioonid on kõrgemad kui looduses). Seda liiki jäätmed tekivad uraani ja teiste mineraalide, nagu väetistes kasutatavate fosfaatide kaevandamisel ja töötlemisel.

NORM jäätmed tekivad kaevandamisel ja väetiste valmistamisel

Transuraansed jäätmed sisaldavad alfaosakesi emiteerivaid radionukliide nagu plutooniumi isotoobid, mõnedes riikides on välja toodud eraldi kategooriana.

Kõrgaktiivseks jäätmeks on üksnes reaktorites kasutatud kütus (riikides, kus seda peetakse jäätmeks) või kõrge aktiivsusega vedelik, mis tekib kasutatud kütuse töötlemisel. Seda tüüpi jäätmete kogus on väga väike, kuid aktiivsus nii kõrge, et sellest tekib märkimisväärset soojust.



Jäätme liik	*Tüüpilised allikad*	*Omadused*	*Lõppladustamine*
Vabastatud jäätmed	Sisaldab väga piiratud hulgal radionukliide	Võib töödelda nagu tavalisi jäätmeid	Tavaline olmeprügila
Kaevandusjäätmed	Aheraine	Ülisuurtes kogustes	Aheraine kuhjad, suuremate kontsentrat-sioonide korral tagasi maa alla viimine
NORM-jäätmed	Mineraalide töötle-misjäätmed torudest ja seadmetest	Looduslike nukliidide kõrgendatud tasemed	Aheraine kuhjad madalama astme korral, maapinnal ladustamine suuremate kontsentrat-sioonide korral
Madala ja keskmise aktiivsusega jäätmed	Saastatud paber, rõivad, laborivarustus, saasta-tud pinnas ja ehitusma-terjalid	Piiratud soo-juse teke	Lühema poolestus-ajaga maalähedastes hoidlates või keskmise sügavusega kaevandus käikudes (60-100 m sügavusel)
	Jahutustiikide välja-voolumuda töötlemisel tekkivad ioonivahetus-materjalid		Pikem ladustamine sügavamate ladustus-paikade rajamise ootel
Alfajäätmed	Madala ja keskmise aktiivsusega jäätmed, kuid alfareostusega (eriti plutoonium)	Mõnes riigis erikategooria	Geoloogiline ladusta-mine, keskmised süga-vused (mõnikümmend meetrit)
Kõrgaktiivsed jäätmed	Kasutatud kütus (töötlemisel jäätmena) Kõrgaktiivne vedelik taastöötlusest	Tugev varjes-tus ja jahuta-mine	Geoloogiline ladusta-mine, suured sügavused (mitusada meetrit loo-duslikes moodustistes)

Jäätmekäitluse eesmärgiks on töödelda jäätmeid selliselt, et nad sobiksid hoidmiseks ja ladustamiseks ning hoida või ladustada neid nii, et ei tekiks lubamatuid riske praegustele ja tulevastele põlvkondadele. Selles väljaandes tähendab ladustamine, et puudub kavatsus jäätmeid uuesti käibele võtta, kuigi see võib võimalik olla.

Paljudes riikides paigutatakse lühiealised jäätmed maapinna lähedastesse ladustuspaikadesse, mis tegelikult on mõne meetri sügavused muld- või betoonkanalid. Hoidlasse paigutatud jäätmed kaetakse mõne meetri paksuse mullakihiga ja sageli vee eemale hoidmiseks saviga. Sarnast meetodit kasutatakse mõnes riigis suurte koguste NORM jäätmete puhul, nagu kaevandamisel ja uraani peenestamisel tekkiva aheraine ladustamisel. Näiteks Rootsi kasutab Läänemere põhja all Forsmarkis asuvat hoidlat peamiselt lühiealiste madala ja keskmise aktiivsusega radioaktiivsete jäätmete jaoks.

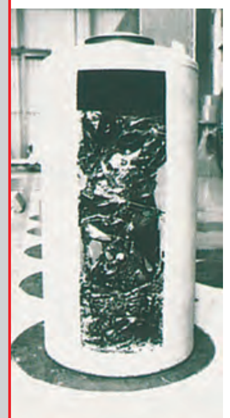
Maa-alune hoidla Rootsis



Madala ja keskmise aktiivsusega jäätmed ei teki kohe ladustamiseks sobivas vormis, neid on vaja segada inertsete materjalidega nagu betoon, bituumen või kumm. Minevikus uputasid mõned riigid selliseid jäätmed ookeani, kuid see praktika keelati Londoni konventsiooniga. Alates keelustamisest hoitakse radioaktiivseid jäätmed kuni ladustamismeetodi valimiseni. Kõige sobivamaks peetakse soodsates geoloogilistes tingimustes asuvaid sügavaid maa-alused hoidlaid. Ehkki paljud riigid kavatsevad seda tüüpi geoloogilisi hoidlaid tulevikus kasutada, töötab praegu ainult üks selline ladustuspaik USAs – jäätmete isoleerimise piloottehas (Waste Isolation Pilot Plant – WIPP) New Mexicos aktiniide sisaldavate jäätmete jaoks.

Kui kasutatud tuumakütust kavatsetakse kohe ladustada ning mitte ümber töödelda, hoiustatakse kasutatud tuumakütus lühiajaliselt kas tuumaelektrijaama territooriumil või spetsiaalsetes rajatistes. See võimaldab kütusel jahtuda, kuid loomulikult tuleb hoida kasutatud tuumakütust seal seni kuni lõppladustuspaik on olemas. Ümbertöötlemisprotsessides tekkivaid kõrgaktiivseid vedeljäätmeid hoitakse tavaliselt spetsiaalsetes jahutatud mahutites, kuid kasutatakse ka seadmeid vedeljäätmete tahkestamiseks klaasjate materjalide abil (vitreerimine). Klaasplokkidel lastakse jahtuda mitukümmend aastat, enne kui nad lõplikult ladustatakse, eeldatavalt sügaval maa all.

Vitreeritud kõrgaktiivne radioaktiivne jääde



Dekomisjoneerimine

Dekomisjoneerimise protsess saab alguse tuumarajatise (või rajatise osa) tööea lõpust ning selle tulemusena saavutatakse pikaajaline ohutu lahendus. Dekomisjoneerimine võib hõlmata aparatuuri või hoonete puhastamist radioaktiivsest saastest, rajatiste või struktuuride demonteerimist ja järelejäänud radioaktiivsete materjalide teisaldamist või viimist radioaktiivsete jäätmete käitluskohta. Paljudel juhtudel on lõppeesmärgiks puhastada tegevuskoht kõikidest olulistest radioktiivsetest jäätmetest ja saastest, kuid see pole alati võimalik või vajalik.

Greifswaldi ja Rheinsbergi dekomisjoneerimisprojekt Saksamaal. J. Ford/IAEA

Praeguseks on vaid üksikud kommertstuumarajatised lõplikult dekomisjoneeritud. Siiski on suure hulga erinevate seadmete, sealhulgas mõne tuumaelektrijaama, mitmete prototüüpide ja uurimisreaktorite ning arvukate laboratooriumide ja töökodade dekomisjoneerimisest saadud palju kogemusi. Asjaolu, et paljudel maailma tuumareaktoritel on lähenemas kasutusaja lõpp, on koondanud tähelepanu dekomisjoneerimisega seotud küsimustele.



Pärast tuumakütuse eemaldamist varjestatakse reaktori südamik dekomisjoneerimistööks

Dekomisjoneerimine vajab ranget kontrolli tegevuste üle, et optimeerida töötajate ja elanikkonna kaitsmine. Rajatiste kõige radioaktiivsemate osade, eriti reaktori südamike käsitsemiseks on välja töötatud kaugkasutustehnoloogiad. Suurte rajatiste demonteerimine tekitab suurtes kogustes „jäätmeid”. Nende hulgas on ka madala ja keskmise aktiivsega radioaktiivsed jäätmed. Üle jääb ka suurel hulgal ehiusmaterjale nagu teras ja betoon, mis pole märkimisväärselt radioaktiivsed. Vahel on vaja erimenetlust, et määratleda neid vabastatud jäätmetena, mis tähendab, et neid ei pea käitlema nagu radioaktiivseid jäätmeid.

Ladustamiskriteeriumid

Sobivate jäätmekäitlusmeetodite üle on palju vaieldud, võttes arvesse nii probleemi kiirguskaitselist kui ka sotsiaalset aspekti. Üksmeel näib olevat saavutatud seisukohas, et tulevased sugupõlved peaksid olema samal määral kaitstud kui praegused põlvkonnad. Paraku on seda raske üle kanda kiirguskaitse praktiliste standardite tasandile. Näiteks võib aktiivsus ilmneda geoloogilises süvahoidlas mitme tuhande aasta pärast ja meil pole vähimatki ettekujutust, millised on meie järglaste harjumused või elulaad nii kauges tulevikus.



Negatiivse rõhu all olev ruum, kus demonteeritud detailid kokku surutakse ja spetsiaalsetesse konteineritesse paigutatakse

Teiseks nõudeks on põhimõte, et igasugune kiiritus peab olema nii väike kui mõistlikult on võimalik saavutada, arvestades majanduslike ja sotsiaalseid faktoreid. See tähendab, et sama liiki jäätmete jaoks on erinevaid käitlusvõimalusi – sealhulgas töötlus, immobiliseerimine, pakendamine ja ladustamine. Valiku tegemisel tuleb lähtuda seonduvatest riskidest, kuludest ja teistest vähem kvantifitseeritavatest, kuid mitte vähem olulistest faktoritest.

Samuti tuleb valiku tegemisel arvestada kiirguskaitse eesmärkidega, kuid lõpliku otsuse tegemisel võivad määravaks olla hoopis muud asjaolud. Jäätmete ladustamisviisi üle otsustamisel tuleb ühiskonnal vastata raskele küsimusele – kui kaalukaks pidada kauges tulevikus avalduda võivate kahjulike tagajärgede matemaatilist tõenäosust. See pole ainult jäätmete ladustamise ega kiirguskaitse probleem, ehkki seda just sellega seoses rõhutatakse.

Eetiline oleks eeldada, et praegused tingimused jäävad kestma ja tulevaste põlvkondade poolt saadav kahjustus on väiksem või võrdne meie põlvkonna poolt saadavate kahjustusega. Selle juures tuleb muidugi arvestada võimalike mõjude sajanditeks ja aastatuhandeteks prognoosimise määramatust.

Muud jäätmekäitlusviisid

Mõned minevikus kasutatud jäätmekäitlusviisid pole erinevatel põhjustel olnud piisavalt head ja mõnel juhul on selle tagajärjeks olnud tegelik või potentsiaalne pikaajaline keskkonnareostus.

Üheks näiteks on sõjalised operatsioonid. NSV Liidu (ja hiljem Vene Föderatsiooni) Põhja laevastiku tuumaallveelaevasid on aastate jooksul kasutusest kõrvaldatud. Paljud neist seisavad endiselt dokis, oodates vajalikku käitlemist. Aastate eest esines aga juhtumeid, kus NSV Liit uputas allveelaevadel tekkinud radioaktiivsed jäätmed ja isegi kasutatud tuumakütuse merre, peamiselt Kara ja Barentsi merre Arktikas. IAEA poolt aastatel 1993–1997 koordineeritud rahvusvahelise Arktika merede hindamisprojekti raames, uuriti olukorda ja järeldati, et tahkete jäätmete väikeste aktiivsuste ja merevee lahjendava toime tõttu on doosid elanikkonnale väga väikesed (alla 0,001 mSv aastas).



Uraani-kaevandamise aherainekuhjad Tadžikistanis. F. Harris/IAEA

Mereväelased võivad saada sellest oluliselt kõrgemaid doose, mis on võrreldavad looduslikest allikatest saadavate doosidega (kuni mõni mSv aastas). Mõnel pool maailmas avaldavad mõju kaevandusjäätmete ja radioaktiivsete maakide töötlemisjäätmete suured ladustatud kogused. Peamiselt on need seotud uraani kaevandamisega. Kuid mõnes piirkonnas esineb looduslikke radionukliide nii ohtralt, et kõik kaevandamisjäägid (millest mõned pärinevad keskajast) kujutavad endast juba märkimisväärset kiirgusohtu. Teatud tööstusharud nagu väetiste valmistamine ja nafta- ning gaasitööstus, tekitavad samalaadseid jäätmeid. Kõik protsessiga seotud radionukliidid on loodusliku päritoluga ja seetõttu on alles üsna hiljuti hakatud sellistesse jäätmetesse suhtuma kui kiirguskaitse probleemi. Maakides sisalduvate radionukliidide tasemed on reeglina keskmisest kõrgemad. Keemiliste ja füüsikaliste protsesside tagajärjel suurendatakse neid kontsentratsioone veelgi (ehkki nende aktiivsuskontsentratsioonid ei ole väga kõrged, võrreldes tuumajäätmete aktiivsuskontsentratsioonidega). Lisaks on maakides sisalduvatel radionukliididel äärmiselt pikk poolestusaeg ja jäätmete kogused on sageli väga suured.

Selliseid jäätmeid tuleb ohutult käidelda, näiteks spetsiaalsetel savikupliga katmikpindadel. Mitmed riigid nagu Kanada, USA, Saksamaa ja Austraalia kasutavad selliseid meetodeid. Paraku pole arengumaadel, näiteks Kesk-Aafrika riikidel ja mõnel varem NSV Liidu koosseisu kuulunud Kesk-Aasia vabariigil vahendeid, et nii suuri materjalikoguseid analoogiliselt töödelda. IAEA on üks organisatsioonidest, kes aitab neil riikidel ohutuid lahendusi leida.

Peatükk 13 Avariid

Vaatamata kõikidele ohutusmeetmetele, mida kiirguse ja radioaktiivse materjalide kasutamisel rakendatakse, võib siiski juhtuda õnnetusi.

Avarii võib toimuda tuumarajatises ja viia radioaktiivse materjali vabanemiseni, selle pihkumiseni väljaspoole rajatise piire ning siis on vaja elanikkonna kaitseks rakendada kiireid meetmeid. Mõnel juhul võib radioaktiivse aine vabanemine jääda lühiajaliseks, teistel juhtudel kesta kauem. Rasked õnnetused juhtusid 1957. aastal Windscale'is (ÜK) ja Kõštõmis (tookord NSV Liit, nüüd Vene Föderatsioon), 1979. aastal Three Milesi saarel (USA) ja 1986. aastal Tšernobõlis (tookord NSV Liit, nüüd Ukraina). Ehkki selliseid õnnetusi tuleb ette harva, on arukas nendeks valmis olla.

Kõige sagedamini on juhtunud avariisid tavalisemate meditsiinis, teaduses ja sõjalistel eesmärkidel kasutatavate kiirgusallikatega. Viimastel aastatel on IAEA andmetel aset leidnud aastas keskmiselt kolm või neli hädaolukorda, mille käigus inimesed on saanud suuri doose, sest kiirgusallikad on kaduma läinud, varastatud, kõrvale heidetud või on neid valesti kasutatud. 1987. aastal toimus intsident Goianias Brasiilias, kus mahajäetud hoonest leitud meditsiiniline kiirgusseade põhjustas nelja inimese surma kiirituse tõttu. Pärast seda on kogu maailmas toimunud üle 12 kiirgusallikaga seotud intsidendi, mis on lõppenud surmaga. (vt tabel lk 66).

Goiania õnnetuse käigus saastatud hoone lammutamine ja lammutusprahi koristamine



Tokaimura õnnetust 1999. aastal võib pidada tavatuks, sest seal käivitus kogemata rikastatud uraani keemilise töötlemise ajal ahelreaktsioon. Keskkonda vabanes ainult väga väike kogus lühiealisi radionukliide. Selles õnnetuses oli radioloogilise ohu põhjustajaks otsene kiirgus – eriti neutronkiirgus, mis vabanes anumast, kus toimus ahelreaktsioon. Sellise reaktsiooni tekkimist ei olnud võimalik ette näha ning seetõttu puudus ka kaitsevarjestus, mis oleks olnud näiteks tuumaelektrijaamal. Sellest tulenevalt põhjustas kiirgus märkimisväärseid doose ka väljaspool hoonet.

On hädaolukordi, mille mõjud avalduvad ka väljaspool riiki, kus avarii toimus. Hädaolukordadega seonduvate küsimuste reguleerimiseks on olemas õiguslikult siduvad rahvusvahelised kokkulepped. Kõik riigid, kus on töötavad tuumaelektrijaamad (ja lisaks veel 50 riiki) on ühinenud tuumaavariist varase teavitamise konventsiooniga, mis sätestab, et naaberriike tuleb informeerida toimunud õnnetusest, juhul kui see võib neile mõju avaldada. Teavitada tuleb ka IAEAd, kes aitab kaasa informatsiooni levitamisele.

Rohkem kui 80 riiki on ühinenud tuumaavarii või kiirgusliku avariiolukorra puhul abi andmise konventsiooniga ja võtnud endale kohustuse osutada abi avarii korral, kui ükskõik milline riik selleks soovi avaldab. Konventsiooni kohaselt on IAEAl tähtis roll informatsiooni levitaja ja abi koordineerijana.

Tuumaavariid

Avariide korral piisava kaitse tagamiseks nõuavad kiirgustegevuslube väljastavad riiklikud pädevad asutused suurtelt tuumarajatistelt nagu reaktorid üksikasjalikku kiirgusohutushinnangut. Hinnangud näitavad ära hädaolukordade potentsiaalse kulgemisahela, mis võib viia radionukliidide vabanemiseni. Avariiplaanide koostamisel võetakse aluseks kulgemisahel, mis võib viia suurima radionukliidide vabanemiseni keskkonda, võttes arvesse reaalseid tingimusi. Plaane võib alati muuta veel põhjalikumaks ja laiendada juhuks, kui vastu tõenäosust peaks toimuma veel raskem avarii.

Kui avarii toimub reaktoris, võivad erinevad gaasilised, vedelad või tahked radionukliidid paiskuda atmosfääri. Seal võivad nad radioaktiivse pilvena tuulega eemale kanduda, hajuda või lahustuda. Osa neist langeb maapinnale, eriti koos vihmaga. Radionukliidide kontsentratsioon õhus kahaneb kiiresti rajatise asukohast pärituule suunas nagu ka põhjustatud kahjustused. Vaatamata sellele võivad suured radionukliidide hulgad langeda maapinnale väga kaugel rajatisest.

Pilve hajumine ja radionukliidide sadenemine

Tuulest kantud radioaktiivne materjal

Väline kiirgus

Sissehingamine

Vihm „peseb” radionukliidid pilvest välja

Toiduainete saastumine

Saastusest tingitud väline kiirgus



Kaitsemeetmed

Õnnetuspaiga lähedal elavate inimeste kiirgusdoosi vähendamiseks on vaja kasutusele võtta kaitsemeetmed. Erinevaid kaitsemeetmeid võib kasutada nii üksikult kui ka kombineeritult. Mõned neist – kiireloomulised meetmed – on vaja tõhususe tagamiseks rakendada enne, kui radioaktiivne materjal vabaneb keskkonda. See tähendab näiteks seda, et otsused kaitsemeetmete rakendamiseks tuleb langetada tehases toimuva (ning prognoosi) põhjal, mitte aga oodata, kuni vabanemine reaalselt tuvastatakse. See võib mõnel juhul põhjustada kaitsemeetmete ennetava rakendamise, mis võib osutuda mittevajalikuks, kuid seda tuleb eelistada liiga hilisele tegutsemisele.

Inimestele võib soovitada hoonetesse jäämist kuni saastepilv on eemaldunud ning radioaktiivse aine vabanemine keskkonda on lõppenud. Selleks, et vältida radioaktiivse joodi tungimist kilpnäärmesse, on võimalik võtta mitteradioaktiivse joodi tablette. Vahel on vajalik ajutiselt piirata piima ja juurvilja ning muude kohapeal toodetud toiduainete müüki. Kui pilv on möödunud, võib rakendada lihtsaid kaitsemeetmeid maapinna aktiivsuse kõrvaldamiseks – teede ja radade veega uhtminevõi aedadest rohu niitmine ja äraviimine.

Kui avarii on möödas, võib osutuda vajalikuks teiste kaitsemeetmete rakendamine pikema ajaperioodi jooksul, et kaitsta elanikkonda jääkaktiivsuse eest.

Tuumatööstusega riikidel on põhjalikud ja läbiproovitud hädaolukorra lahendamise plaanid, samuti on sellised plaanid paljudes riikides, mida võib mõjutada naaberriigis toimunud õnnetus. Iga tuumatööstusega seotud ettevõte peab välja töötama hädaolukorra lahendamise plaani ja tutvustama seda kohalikele elanikele. Plaan näeb ette käitaja personali, kohaliku omavalitsuse ja päästeteenistuste kaasamist. Kaasatakse ka riigiasutused ja -ametid – igaüks rakendab oma kiirgusalaseid ressursse ja ekspertiisi.

Tüüpiliseks hädaolukorra lahendamise plaani ülesehituse aluseks on sündmuste kulgemisahel. Kiirgustegevusloa omaja edastab avarii algstaadiumis päästeteenistusele selgitused elanikkonna kaitsemeetmete rakendamise kohta. Õnnetuskohast eemal moodustatakse kiiresti koordinatsioonikeskus, kus konkreetsed vastutajad ja tehnilised nõustajad otsustavad, mida on võimalik elanikkonna kaitseks teha ja milliseid nii keskkonnaseire kui asjakohaseid kaitsemeetmeid rakendada.
Elanikkonna teavitamine korraldatakse meedia vahendusel.

Nagu eespool märgitud, võivad tuumaavariid avaldada mõju väga suurtele aladele. Seetõttu nõuab tuumaavariidest varajase teavitamise konventsioon, et iga riik, kus juhtus avarii, mis võib mõjutada naaberriike, informeeriks sellest koheselt IAEAd ja kõiki naaberriike, kuhu mõju võib ulatuda.

Hädaolukorra lahendamise plaani ettevalmistamine ei piirdu üksnes tuumarajatistega. Kiirgusallika kasutamiskohtades peab samuti olema asjakohane plaan võimalike hädaolukordade lahendamiseks. Need ei pea olema nii põhjalikud kui tuumaelektrijaamadel, kuid peaksid hõlmama kõiki avariisid, mis üldse võivad juhtuda.

Kaitsemeetmed avarii korral

Varjumine pilve eest hoonetes

Ajutine ümberpaigutamine kodudest

Jooditablettide manustamine

Saastunud toiduainete kasutamise keelamine

Sekkumisstandardid

Kaitsemeetmete rakendamine pärast õnnetust on teine näide protseduurist ja ICRP nimetab seda sekkumiseks. Peatükis 5 nägime, et sekkumine peab olema õigustatud ja optimeeritud. Vajalik on ka lisada, et kaitsemeetmeid dooside vältimiseks tuleb rakendada juhul, kui võimalikud saadavad doosid on piisavalt kõrged, et põhjustada kiirituse ohvritele – eriti aga lastele – selgesti tuvastatavaid kahjustusi. BSS annab sekkumistasemed, mille juures on vajalik elanikkonna kaitseks rakendada kaitsemeetmeid. Tasemed on abiks, et valida konkreetses olukorras kõige sobivam tegevus.

Rahvusvahelised kaitsemeetmete sekkumistasemed

Kaitsemeede	*Elund*	*Välditava doosi suurus*
Varjumine	Kogu keha (efektiiv)	10 mSv 2 päeva jooksul
Evakueerimine	Kogu keha (efektiiv)	50 mSv 1 nädala jooksul
Joodi manustamine	Kilpnääre	100 mGy

Tegutsemistasemed teatud toiduainete ja vee kohta (Bq/kg)

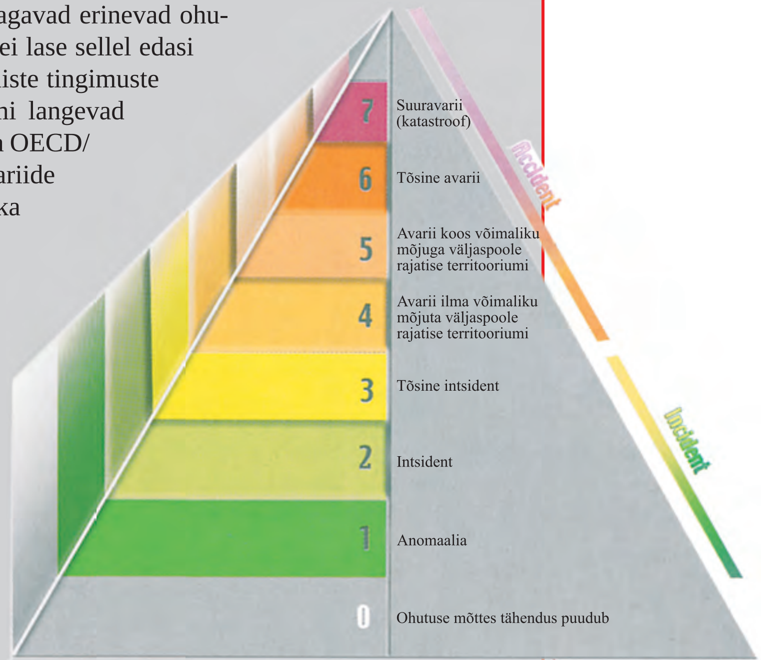
Radionukliid	*Piim, imikutoidud ja joogivesi (Bq/kg)*	*Teised toiduained (Bq/kg)*
Strontsium-90		100
Jood-131	100	
Plutoonium-239	1	10
Tseesium-137	1000	1000

Allikas: Rahvusvahelised põhilised ohutusnormid kaitseks ioniseerivast kiirgusest tulenevate ohtude eest, Skeem V, tabel V-I

Tšernobõli avarii tagajärjel kehtestas FAO ja WHO toiduainetekoodeksi komisjon radioaktiivselt saastunud toidu sekkumistasemed. Pärast võimalikku avariid teenivad sellised tasemed esimese aasta jooksul eelkõige rahvusvahelise kaubanduse huve, kuid annavad kasulikke juhiseid ka riikide pädevatele asutustele, kes vastutavad toiduainete kohaliku tarbimise eest.

Avalik teave

Kui tuumarajatise töös esineb kõrvalekaldeid, tagavad erinevad ohutussüsteemid tavaliselt kontrolli olukorra üle ja ei lase sellel edasi areneda hädaolukorraks. Ainult väga ebatõenäoliste tingimuste kokkulangemisel – näiteks mitu ohutussüsteemi langevad korraga rivist välja, võib toimuda avarii. IAEA ja OECD/NEA on välja töötanud rahvusvahelise tuumaavariide skaala (INES), et selle abil nii meediale kui ka avalikkusele lihtsalt selgitada juhtumi tõsidust. Juhtumite skaala on seitsmepalliline: aste 0 tähendab, et probleem tekkis, kuid ohutussüsteemid töötasid tõrgeteta ja probleem kõrvaldati enne kui tekkis risk töötajatele või elanikkonnale, aste 7 aga tähendab tuumakatastroofi nagu Tšernobõli õnnetus 1986. aastal.



Rahvusvaheline tuumaavariide skaala (INES)

Muud kiirgusavariid

Nagu tuumaavariide puhulgi, on kiirgusallikatega seotud avariiolukordade lahendamisel kaks tahku: teha kõik võimalik hädaolukorra ärahoidmiseks, kuid olla siiski alati valmis reageerima, kui midagi peaks juhtuma. Tagades, et kiirgusallikaid kasutavad ja hooldavad ainult ametialaselt kvalifitseeritud ja väljaõppe saanud inimesed, on võimalik kiirgusallikatega seotud avariisid vältida. Kiirgusallikatega töötamisel tuleb järgida kehtestatud eeskirju, et kindlustada allika õige kasutamine ning et allikas ei lähe kaduma, seda ei kahjustata ega varastata või see ei lähe muul viisil vastutava kasutaja kontrolli alt välja. Riiklikud institutsioonid peavad sisse seadma asjakohase ja usaldusväärse süsteemi, et saada ülevaade kiirgusallikate asukohtadest ja vastutavatest inimestest. Viimastel aastatel on IAEA oma tehnilise koostööprogrammi kaudu teinud märkimisväärseid pingutusi, et aidata riikidel välja arendada süsteeme nende territooriumil paiknevate allikate kontrollimiseks.

Ohutushinnangu kiireks edastamiseks

IAEA aitab Gruusiat kõrvalistesse piirkondadesse jäetud kiirgus-allikate otsimisel. P. Pavlicek/IAEA

Vaatamata teatud edule esineb aeg-ajalt ikkagi avariisid, seega on ennetava töö jätkamine vajalik. Kui hädaolukorrad ikkagi juhtuvad, tuleb kasutusele võtta meetmeid, mis võimaldavad taastada kontrolli hädaolukorra põhjustanud allika üle – muuta kiirgusallikas ohutuks, ravida kiiritada saanud inimesi, selgitada välja hädaolukorra tekkimise põhjused ning teha järeldusi, kuidas selliseid juhtumeid tulevikus vältida. Mitmel juhul on riigid kiirgushädaolukordade puhul sageli palunud abi ka IAEAlt tuumaavarii või kiirgusliku avariiolukorra puhul abi andmise konventsiooni raames.



Peatükk 14 Kiirgusallikatega seotud riskid

Igapäevases elus kasutavad kiirgusallikaid ja -tehnoloogiaid kvalifitseeritud spetsialistid hästi juhitud ja heal tasemel korraldatud asutustes. Nagu eespool kirjeldatud, võivad kiirgusallikateks olla generaatorseadmed, nagu meditsiinis kasutatav röntgenaparatuur või osakeste kiirendi. Allikateks võivad olla ka kinnistesse konteineritesse või kesta suletud radioaktiivsed materjalid. Mõned allikad, eriti need mida kasutatakse tuumameditsiinis ja teadusuuringuteks, on lahtisel kujul radioaktiivsed materjalid. Probleemid tekivad, kui kiirgusallikad satuvad avariidesse, kui neid kahjustatakse või nad lähevad kaduma.

Kiirgusallikatega seotud õnnetused

Kiirgusallikad on leidnud laialdast kasutamist tööstuses. Õnnetusi võib juhtuda nii puudulikult reguleeritud kasutuse kui ka valede otsuste tagajärjel. Viimase 50 aasta jooksul on teadaolevalt juhtunud suur hulk intsidente, mis on seotud kiirgusallikate ja radioaktiivsete materjalidega. Kahjuks on esinenud ka liigsest kiiritusest põhjustatud surmajuhtumeid. Paljudele on kiiritus põhjustanud tõsiseid, vahel invaliidistavaid haigusi. Mõnel juhul on tervisekahjustustele lisandunud veel ulatuslik ja suurte taastamiskuludega keskkonnakahjustus. Suurte avariide ühine nimetaja on ohutus- või turvanõuete rikkumine. Teiseks ühiseks tunnuseks on asjaolu, et suuremat osa neist oleks saanud ära hoida, kui oleks rakendatud rahvusvahelisi standardeid, mis on just selle eesmärgiga välja töötatud ja kasutusele võetud.

Kiirituskahjustus paremal käel



Aastatel 1945–1999 teatati 140 tõsisest õnnetusest tuumatööstuses, militaarrajatistes, uurimisasutustes ja tööstuses üldiselt, mis põhjustasid ulatusliku kiirituse. Kõige sagedamini oli tegemist (kokku 70 juhul) kinniste allikate vale käitlemise või kasutamisega radiograafias ja kiiritusravis. Mõned kõige rängemad tervisekahjustused tekkisid raviotstarbeliste kiirgusallikatega kokkupuute tagajärjel, kui kasutuselt kõrvaldatud haiglaaparatuuri metallosadega viisid inimesed kaasa ka kiirgusallikaid, teadmata, kui tõsist kiirgusohtu need endast kujutavad. Kahjuks esineb meditsiinipraktikas ka patsientide tahtmatuid ülekiiritamise juhtumeid, põhjuseks reeglina inimlik viga või kiirgusallika puudulik kalibreerimine.

Järgnev tabel annab ülevaate kõige tõsisemate surmaga lõppenud õnnetuste kohta aastatel 1987–2001.

Viimastel aastatel surmaga lõppenud kiirgusõnnetused (1987–2001)[a]

Aasta	Koht	Allika tüüp	Surm kiirituse tagajärjel		
			Töötajad	*Elanikkond*	*Patsiendid*
1987	Goiana, Brasiilia	Teleteraapia allikas		4	
1989	San Salvador El Salvador	Tööstuslik sterilisaator	1		
1990	Saragossa, Hispaania	Kiirgusteraapia kiirendi			Mitu[b]
1990	Soreq Iisrael	Tööstuslik sterilisaator	1		
1991	Nesvitš, Valgevene	Tööstuslik sterilisaator	1		
1992	Hiina	Kaotatud koobalt-60 allikas		3	
1992	USA	Brahhüteraapia			1
1994	Tammiku, Eesti	Jäätmehoidlast varastatud allikas		1	
1996	San Jose Costa Rica	Kiiritusravi			Mitu[b]
1997	Sarov, Vene Föderatsioon	Kriitiline montaaž	1		
1999	Tokaimura, Jaapan	Kriitilisusest põhjustatud avarii	2		
2000	Tai	Kaotatud koobalt-60 allikas		3	
2000	Egiptus	Kaotatud koobalt-60 allikas		2	
2001	Panama	Kiiritusravi üledoos			Mitu[b]

Märkused:
[a] Tuumarajatistes ja mittetuumatööstuses, uurimis- ja meditsiiniasutustes

[b] kannatanud olid kiiritusravi saavad vähihaiged ja seetõttu pole ülekiirituse tõttu surnud isikute arv teada

Ülekiiritatud patsientide arv oli 26 (Saragossa), 115 (San Jose), ja 28 (Panama)

Iga juhtumi korral saadud kiiritus oli tõenäoliselt mitme surmajuhtumi otseseks või kaudseks põhjustajaks

Saastumisjuhtumeid põhjustanud kaotatud allikad

Paljud kiirgusallikad on kinnised seadmed, kus radioaktiivne materjal on kindlalt suletud või seotud vastavasse kapslisse või kesta, teised aga koosnevad lahtisest radioaktiivsest materjalist. Kinniste radioaktiivsete allikate puhul on ohtlik ainult kokkupuude väliskiiritusega. Siiski võivad kahjustatud või lekkivad kinnised allikad, samuti lahtised radioaktiivsed materjalid põhjustada keskkonna radioaktiivse saastumise ja radioaktiivsete ainete sattumise inimese organismi. Eriliseks probleemiks on kasutatud radioaktiivsete allikate juhuslik ümbersulatamine koos taaskasutusse võetud vanarauaga. Alljärgnev tabel hindab ulatusliku saastuse juhtumeid, millega on seotud allikad, mis satuvad metallitööstuse taaskasutustsüklisse.

Kaotatud allikatega seotud rasked saastumisjuhtumid

Kaotatud allika tüüp	*Kogu maailmas teadaolevad juhtumid (1983–1998)*	*Taaskasutatud metall*
Koobalt-60	15	Teras (14), vask
Tseesium-137	30	Teras (27), alumiinium (2), plii
Indium-192	1	Teras
Raadium-226	3	Alumiinium (2), teras
Toorium-232	3	Alumiinium (2), teras
Ameriitsium-241	3	Alumiinium, vask, kuld
Muud	4	Alumiinium, vask, tsink,
Kokku	***59***	

Kõik need juhtumid avaldasid vastavale tööstusele olulist majanduslikku mõju ning mõnel juhul ilmnesid keskkonna- ja tervisekahjustused. Lisaks loetletud juhtumitele on teada arvukalt teisi juhtumeid, kus kadunud allikad avastatakse metalli ümbertöötlemistööstuses kasutatavate kiirgusdetektorite abil. Kiirgusdetektorite ülespanek kasutatud metalli ümbertöötlemistööstustes ning vanaraua kokkuostudes on saanud paljudes riikides levinud praktikaks ja seetõttu on oodata tõsiste saastusjuhtumite arvu langust.

Seadmed, mille abil saab radioaktiivseid aineid keskkonda paisata

Ehkki mõned ülalkirjeldatud sündmustest olid seotud allikate vargusega inimeste poolt, kes ei mõistnud oma tegevusega kaasnevat riski, on sihilikud katsed kasutada radioaktiivseid allikaid terrorirelvadena äärmiselt haruldased. Pärast 2001. aasta 11. septembri terrorirünnakuid USAs on palju arutletud võimaluse üle, et terroristid valmistavad seadme radioaktiivsuse keskkonda paiskamiseks ehk „räpase pommi", kasutades tavalisi lõhkeaineid ja varastatud radioaktiivset allikat. Selline pomm ei põhjusta tuumaplahvatust, kuid olenevalt pommi võimsusest paiskab radioaktiivse materjali laiali mitme ruutkilomeetri suurusele alale. Nii on võimalik – nagu eespool kirjeldatud avariide puhul – tekitada vähesel hulgal kohalikke intsidente, mille üldine kiirgusefekt oleks aga piiratud. Mida suuremale alale materjal hajub, seda rohkem selle kontsentratsioon langeb ning seda väiksemaks muutuvad inimestele põhjustatavad doosid. Siiski võivad sellised pommid tekitada tõsised häired elanikkonna igapäevaelus. Sellise seadme ehitamine põhjustaks ilmselt ka terroristidele ohtlikult suuri kiirgusdoose, kuid oleks siiski võimalik, kui nad hoolimata enda ohutusest suudaksid hankida kiirgusallika. Niisugune väljavaade rõhutab veelkord tõhusate meetmete rakendamise vajalikkust et tagada kiirgusallikate hoidmine kindla kontrolli all, kuni nad on lõplikult ohutustatud.

Peatükk 15 Radioaktiivse materjali transport

Kogu maailmas toimub radioaktiivsete materjalide transport tavalises korras – lennukite, laevade, autode ja rongidega. Transporditavate materjalide hulk on lai: materjalid, mis on seotud tuumakütusetsükliga – uraanimaakidest kasutatud kütuse ja radioaktiivsete jäätmeteni, aga ka radionukliidid tuumameditsiini ja teaduslike uuringute tarbeks ning tööstuses ja kiiritusravis kasutatavad allikad. Ehkki transpordi ohutusnäitajad on siiani olnud suurepärased, tekitavad aeg-ajalt muret piirkonnad, mida läbitakse. Näiteks on mitmed riigid väljendanud teravat rahulolematust nende territoriaalvetest liiga lähedalt mööduvate radioaktiivseid jäätmeid vedavate laevade pärast.

Kasutatud tuumakütuse elementide transport



Tulenevalt eeltoodust on vaja reegleid mitte üksnes selleks, et viia miinimumini võimalused õnnetuse tekkeks, mille tagajärjel radioaktiivne materjal satub keskkonda, vaid ka selleks, et kindlustada transpordiga seotud töötajate – sealhulgas laadijate ja juhtide ning pilootide – kaitse. Kuna suures osas on tegemist rahvusvaheliste vedudega, oli transpordi ohutus üks esimesi valdkondi, kus IAEA töötas välja ohutusstandardid. IAEA radioaktiivsete materjalide ohutu transpordi eeskirjad avaldati esimest korda 1961. aastal ja sellest alates on neid regulaarselt läbi vaadatud ja täiendatud.

Eeskirjad hõlmavad vajaliku pakendamise, varjestuse, märgistuse ja muud ohutusnõuded, mida tuleb erinevat tüüpi radioaktiivset materjali vedades täita. Selle juurde kuuluvad ka testid, millega kontrollitakse pakendite vastupidavust võimalikele õnnetustele. Nõuded on liigitatud järkudesse vastavalt transporditava materjali aktiivsusele. Üldiselt kasutatakse ohtlikumate radioaktiivsete materjalide puhul ka suuremas koguses ja vastupidavamat pakendit ning rakendatakse karmimat kvaliteedi- ja administratiivkontrolli.

IAEA transpordieeskirju tunnustatakse laialt kui radioaktiivsete materjalide transpordi üleilmset standardit. Mõnel juhul on agentuuri reeglid üle võetud riigisisestesse seadustesse või määrustesse.

Teised riigid töötavad välja oma nõuded radioaktiivsete materjalide transpordile, kuid harmoneerivad need IAEA eeskirjadega. Veel üks viis, kuidas agentuuri reegleid rakendatakse, on rahvusvahelised ohtlike kaupade veo eeskirjad. Erinevad organisatsioonid annavad erinevate transpordiliikide kohta välja reegleid, rahvusvaheline tsiviillennunduse organisatsioon (ICAO) õhutranspordi kohta, rahvusvaheline merendusorganisatsioon (IMO) meretranspordi kohta. Sama teevad piirkondlikud organisatsioonid nagu ÜRO Euroopa maismaa- ja siseveeteede transpordi majanduskomisjoni sisemaatranspordi komitee. Nende organisatsioonide ettekirjutused katavad kõik ohtlike materjalide liigid ja radioaktiivseid materjale reguleeriv osa põhineb IAEA transpordieeskirjadel.

Üldiselt ollakse seisukohal, et vastavus IAEA transpordieeskirjadele (otseselt või teiste normide kaudu) tagab töötajate ja elanikkonna ohutuse. Teatud veoste puhul tekib siiski sageli küsimus, kas need ikka on reeglitega vastavuses. IAEA uuringud on näidanud, et eeskirju rakendatakse laialdaselt. Juhul kui peaks tekkima kahtlus vastavuse osas, on liikmesriikidel õigus paluda IAEAl läbi viia nende reeglite rakendamise hindamine. Rahvusvaheline töörühm külastab riiki, tutvub transpordi nõuete rakendamise korraldusega ja koostab siis järelduste ja soovituste aruande.

Kasutatud kütuse transpordikonteineri ja rongi kokkupõrke taluvustest



Lisa A. **Sõnastik**

Aatom – aineühik, mis koosneb ühest tuumast, mida omakorda ümbritsevad elektronid, millede arv on võrdne prootonite arvuga tuumas. Elemendi kõige väiksem osa, mis võib keemiliselt ühineda teiste aatomitega.

Aatomnumber – prootonite arv aatomi tuumas. Sümbol Z.

Aatommass - elemendi isotoobi massi iseloomustamiseks kasutatatud aatommassiühik, mis on defineeritud kui 1/12 süsinik-12 aatomi massist (1 aatommassiühik on ligikaudu 1.66×10^{-27} kg).

Aeglusti – materjal, mida kasutatakse soojuslikes reaktorites, et vähendada lõhestumisprotsessis tekkinud kiirete neutronite kiirust ja energiahulka. Eesmärk on soojuslike neutronite saamine, mis võivad põhjustada edasisi lõhestumisi.

Aktiivsus – tuumasiirete toimumise kiirus radioaktiivses aines. Kasutatakse radionukliidi hulga mõõtmiseks. Ühik bekerell, sümbol Bq. 1 Bq on üks spontaanne tuumasiire sekundis.

Aktiniidid – 15 elemendist koosnev rühm, mille moodustavad elemendid aktiiniumist kuni lavrentsiumini (aatomnumber on 89 kuni 103). Kõik need elemendid on radioaktiivsed. Rühma kuuluvad ka uraan, plutoonium, ameriitsium ja kuurium.

Alfaosake – radionukliidi emiteeritud osake, mis koosneb kahest prootonist ja kahest neutronist (e heeliumi aatomi tuum).

Beetaosake – elektron või positron, mis on emiteeritud aatomi tuumast või neutronist siirde tulemusena.

Bekerell – vt aktiivsus.

Brahhüteraapia – kinniste kiirgusallikate kasutamine kehas või keha pinnal teatud vähitüüpide raviks.

Dekomisjoneerimine – administratiivne ja tehniline tegevus rajatise vabastamiseks regulatiivse kontrolli alt. Tavaliselt dekomisjoneerimise käigus rajatis lammutatakse, kuid see ei ole alati nii.

Diagnostiline radioloogia – kiirguse (nt röntgenkiirgus) või radioaktiivse aine kasutamine meditsiinis eesmärgiga diagnoosida patsientide haigusi või vigastusi.

DNA – desoksüribonukleiinhape. Komponent, mis kontrollib rakkude ehitust ja elutegevust ning sisaldab pärilikku informatsiooni.

Doos – üldine termin väljendamaks objektis neeldunud kiirguse hulka. Täpsemad terminid on neeldunud doos, ekvivalentdoos, efektiivdoos, kollektiivne efektiivdoos. Sageli kasutatakse efektiivdoosi asemel lihtsalt väljendit doos.

Efektiivdoos – doosisuurus, mis väljendab kiirguse poolt tekitatavat kahju. Saadakse kui ekvivalentdoos igale koele või organile korrutatakse läbi vastava koefaktoriga ning summeeritakse. Ühik siivert, sümbol Sv. Koefaktorid on ära toodud peatükis 3 esitatud tabelis.

Ekvivalentdoos – doos koele või organile, mis väljendab koele või organile tekitatud kahju suurust. Saadakse kui neeldunud doos korrutatakse kiirgusfaktoriga, mis võimaldab arvesse võtta erinevate kiirgusliikide erinevat tervisekahjulikkust koele. Ühik siivert, sümbol Sv. Kiirgusfaktorid on toodud peatükis 3.

Elektriline vastastikmõju – tõukejõud samamärgiliste laengute vahel või tõmbejõud erimärgiliste laengute vahel.

Elektromagnetkiirgus – **kiirgus**, mis koosneb võnkuvatest elektri- ja magnetväljadest. Lainepikkuste ulatus on suur – hõlmates pika lainepikkusega (ja väikese energiaga) raadiolained, keskmise pikkusega nähtava valguse ja ulatudes lühikese lainepikkusega (ja suure energiaga) gammakiirguseni.

Elektron – stabiilne elementaarosake, millel on negatiivne elektriline laeng $1{,}6\times10^{-19}$ C ja mass $9{,}1\times10^{-31}$ kg.

Elektronvolt – energiaühik, mida kasutatakse kiirgusfüüsikas. Võrdub energiaga, mida saab elektron läbides potentsiaalide vahe 1 volt. Sümbol eV. 1 eV on ligikaudu $1{,}6\times10^{-19}$ džauli.

Element – koosneb aatomitest, milledel on sama aatomnumber.

Ergastus – protsess, mille käigus osa kiirguse energiast antakse üle aatomile või molekulile ilma et tekiks ionisatsioon. Energia võib neelduda tuumas või elektronides, kust see võib hiljem kiirgusena vabaneda.

Erüteem – nahapunetus, mille põhjustab veresoonte laienemine. Võib olla põhjustatud suurtest kiirgusdoosidest.

Footon – elektromagnetkiirguse kvant.

Gammakiir – läbitungiv elektromagnetkiirgus, mis vabaneb aatomituuma radioaktiivse lagunemise protsessis. Nähtavast valgusest palju lühema lainepikkusega.

Geenid – kromosoomides paiknevad pärilikkuse bioloogilised ühikud.

Geiger-Mülleri loendur – klaasist või metallist nõu, mis on täidetud madalarõhulise gaasiga ning milles on kaks elektroodi. Ioniseeriv kiirgus põhjustab elektrilahendusi, mida registreeritakse elektriimpulssidena loenduris. Impulsside arv on seotud doosiga.

Grei – vt neeldunud doos.

Inimsiivert – vt kollektiivne efektiivdoos.

Ioniseerimine – protsess, milles aatom või molekul saab elektrilaengu. Ioonide tekitamine.

Ioniseeriv kiirgus – kiirgus, mis on võimeline tekitama kiirguskaitse seisukohalt bioloogilistes materjalides ioonpaare. Näited on alfaosakeste kiirgus, beetakiirgus, gammakiirgus, röntgenkiirgus ja neutronite kiirgus.

Ioon – aatom, molekul või molekuli osa, mis on saanud elektrilise laengu elektronide kaotamise või haaramisega.

Isotoobid – nukliidid, milledel on sama arv prootoneid, kuid erinev arv neutroneid. Ei ole nukliidi sünonüüm.

Jäätmete käitlemine – kõik tegevused, mis on seotud jäätmete käitlemisega: käitlemine, konditsioneerimine, vedu, hoidmine ja ladustamine.

Kiire reaktor – tuumareaktor, milles lõhestumist põhjustavad peamiselt kiired neutronid.

Kiired neutronid – kõrge energiaga (st kiiresti liikuvad) neutronid, tekivad näiteks lõhestumise protsessis. Reaktorite füüsikas defineeritakse kiireteks neutronid, mille kineetiline energia on suurem kui 0,1 MeV, vastav kiirus on umbes 4×10^6 m/s.

Kiirgus – energia, lainete või osakeste kujul, mis levib ruumis. Tekstis kasutatakse sageli sõna kiirgus ioniseeriva kiirguse mõistes, välja arvatud juhtudel kui on olnud vajalik vältida segiminekut mõistega mitteioniseeriv kiirgus.

Kiirguskahjustus – kahjustus, mis tekib teatud inimesel või inimrühmal ja nende järglastel pärast kiiritamist.

Kiirguskaitse – inimeste kaitse ioniseeriva kiirguse mõju eest ning meetmed selle saavutamiseks.

Kiiritamine – kiirgusväljas olemine. Võib olla tahtlik, näiteks meditsiinitarvete tööstuslik steriliseerimine või siis juhuslik, näiteks kiirgusallika läheduses viibimine. Reeglina ei tekita kiiritamine radioaktiivset saastumist, tekitatav kahju sõltub saadud doosist.

Kiiritusravi – kiirguse kasutamine haiguste raviks, tavaliselt vähiraviks.

Kollektiivdoos – elanikkonna poolt saadav kogudoos. Sageli kasutatud kui kollektiivne efektiivdoos.

Kollektiivne efektiivdoos – suurus, mis saadakse liites kokku kõigi teatud rühma liikmete poolt saadavad efektiivdoosid. Tavaliselt on see „teatud rühm“ kõik inimesed, kes saavad kiiritust mingist kindlast allikast.Ühik inimsiivert, sümbol inimSv. Sageli lühendatud kollektiivdoosiks.

Kosmiline kiirgus – suure energiaga ioniseeriv kiirgus avakosmosest. Maapinna lähedal on keerulise koostisega.

Kromosoomid – kepikesekujulised kehad rakutuumas. Sisaldavad geene ehk pärilikkuse kandjaid. Inimesel on 23 paari kromosoome.

Lagunemine – iseenesliku lagunemise protsess või radioaktiivse aine aktiivsuse vähenemine selle protsessi tulemusena.

Lagunemissaadus – nukliid või radionukliid, mis tekkis lagunemise tulemusena. Võib moodustada otsese lagunemise või siis mitme järjestikuse lagunemise tulemusena. Vahel kasutatakse ka mõistet tütarnukliid.

Lainepikkus – vahemaa ainet läbiva elektromagnetlaine kahe järjestikuse harja vahel.

Lõhestumine – raske tuuma lagunemine kaheks (harva ka enamaks) osaks, millede massid on samas suurusjärgus. Harilikult vabaneb protsessi käigus neutroneid ning gammakiirgust.

Lõhestumissaadus – nukliid, mis on tekkinud lõhestumisel või lõhestumise tulemusena moodustunud nukliidi radioaktiivsel lagunemisel.

Lõppladustamine – radioaktiivsete jäätmete paigutamine sobivasse rajatisse väljavõtmise kavatsuseta.

Massiarv – prootonite ja neutronite arv aatomtuumas. Sümbol A.

Mitteioniseeriv kiirgus – kiirgus, mis ei ole ioniseeriv. Näiteks ultraviolettkiirgus, nähtav valgus, infrapunakiirgus, raadiolained.

Molekul – aatomite rühm, mis on keemiliselt omavahel seotud. Väikseim hulk ainet, mis võib omaette eksisteerida ning säilitada aine omadused.

Mutatsioon – DNA keemiline muutus rakutuumas. Mutatsioonid spermas või munarakkudes võivad põhjustada pärilikke mõjusid lastel. Mutatsioonid keharakus võivad põhjustada tervisehäireid.

Neeldunud doos – ioniseeritud kiirguse poolt ainehulgale üle antud energia jagatud selle ainehulga massiga. Ühik grei, sümbol Gy. 1Gy = 1 džaul kilogrammi kohta.

Neutron – osake, millel puudub elektrilaeng, mass umbes $1{,}67 \times 10^{-27}$ kg ja keskmine eluiga umbes 1000 sekundit.

Nukliid – aatomi liik, mida iseloomustatakse prootonite ja neutronite arvuga ning tuuma energeetilise olekuga.

Poolestusaeg – aeg, mis kulub radionukliidi aktiivsuse vähenemiseks poole võrra. Sümbol $t_{½}$.

Positron – stabiilne elementaarosake, millel on positiivne laeng $1{,}6 \times 10^{-19}$ C ja mass $9{,}1 \times 10^{-31}$ kg (sarnane elektronile, kuid positiivse laenguga).

Prooton – stabiilne elementaarosake, millel laeng on $1{,}6 \times 10^{-19}$ C ja mass $1{,}67 \times 10^{-27}$ kg.

PWR – (pressurized water reactor) surveveereaktor.

Pädev asutus – organisatsioon, kellel on õigus reguleerida tuumaenergeetika, kiirguskaitse, radioaktiivsete jäätmete ning transpordi ohutusega seotud küsimusi.

Radioaktiivne – iseloomustab radioaktiivsust. Õigusaktides on mõiste radioaktiivne sageli piiritletud nende ainetega, mis oma radioaktiivsuse tõttu peavad alluma riiklikule kontrollile.

Radioaktiivsed jäätmed – seaduslikel ja regulatoorsetel eesmärkidel on need jäätmed, mille edasist kasutamist pole ette näha ning mis sisaldavad radionukliide, millede kontsentratsioonid või aktiivsused on suuremad kui õigusaktides sätestatud piirmäärad.

Radioaktiivsus – aatomituumade omadus iseeneslikult laguneda. Protsessiga kaasneb tavaliselt ka kiirguse emissioon.

Radiobioloogia – teadus, mis uurib ioniseeriva kiirguse mõju elusorganismidele.

Radionukliid – radioaktiivne nukliid.

Rikastatud uraan – uraan, milles isotoobi U-235 sisaldus on suurem kui 0,7 massiprotsenti, ehk suurem kui looduslikus uraanis.

Risk – tõenäosus kiiritamise tulemusena teatud tervisehäire tekkimiseks inimesel või inimeste rühmal.

Riskifaktor – eluea risk või kiirguskahjustus, mis eeldatavasti tekib pärast ühikulise ekvivalentdoosi või efektiivdoosi saamist. Ühik Sv^{-1}.

Ränidiood – räniühenditest seade, milles ioniseeriva kiirgusega kiiritamisel tekib elektrivool. Vool muundatakse elektriimpulssideks, mida loendatakse. Impulsside arv on seotud doosiga.

Röntgenkiirgus – läbitungiv elektromagnetkiirgus, mida aatom emiteerib kui elektronid kaotavad energiat. Lainepikkused on palju lühemad kui nähtaval valgusel (vt gammakiirgus).

Sadenemine – tuumakatsetuste ning tuumaõnnetuste käigus atmosfääri paiskunud radioaktiivne aine, mis on langenud tagasi maapinnale.

Siivert – vt efektiivdoos ja ekvivalentdoos.

Soojuslik reaktor – tuumareaktor, milles lõhestumist tekitavad peamiselt soojuslikud neutronid.

Soojuslikud neutronid – neutronid, mis on termilises tasakaalus keskkonnaga, kus nad asuvad, s.o neil on sama keskmine soojuslik energia, mis ümbritsevatel aatomitel või molekulidel. Keskmine neutronite energia toatemperatuuril on umbes 0,025 eV, mis vastab kiirusele $2,2 \times 10^{-3}$ m/s.

Tuumareaktor – seade, milles võib tekitada kontrollitavat lõhestumise ahelreaktsiooni. **Tuumasünteesi** puhul on tegemist termotuumareaktoriga.

Tuumasüntees – kahe kerge tuuma liitumine, mille tulemuseks on vähemalt ühe algsetest tuumadest raskema tuuma tekkimine. Selles protsessis vabaneb energia.

Tõenäosus – matemaatiline võimalus, et teatud sündmus võib juhtuda.

Vaba radikaal - ilma laenguta aatom või aatomite rühm, millel on üks või enam paardumata elektroni. Üldiselt keemilises mõistes väga reageeriv.

Vaesustatud uraan – uraan, mis sisaldab alla 0,7 massiprotsendi isotoopi U-235, ehk siis vähem kui looduslik uraan. Uraani rikastamise kõrvalprodukt.

Lisa B. Sümbolid ja ühikud

Teaduslik esitus

Kiirguskaitses esinevaid numbreid on sageli nende suurusjärkudest tulenevalt mugavam kirja panna teaduslikult kui kümnendesituses. Teaduslik esitus sisaldab olulisi arve kuni soovitud hulgani ning korrutamist sobiva kümne astmega. Näited on esitatud tabelis.

Kümnendesitus	*Teaduslik esitus*
1230000	$1{,}23 \times 10^{6}$
100000	10^{5}
3531	$3{,}53 \times 10^{3}$ [a]
15,6	$1{,}56 \times 10^{1}$
0,239	$2{,}4 \times 10^{-1}$ [b]
0,001	10^{-3}
0,000087	$8{,}7 \times 10^{-5}$

Kümnendesitusega arvu teisendamine teadusliku esitusega arvuks.

[a] kolme olulise numbrini

[b] kahe olulise numbrini

Eesliited

Osadel kümne astmetel on spetsiaalsed nimed ja sümbolid. Need võivad olla eesliideteks ka mõõtühikule – näiteks *kilo*gramm, sümbol kg on 103 grammi, *milli*meeter, sümbol mm on 10^{-3} meetrit. Eesliidete tabel on toodud.

Kordsus	*Eesliide*	*Sümbol*	*Kordsus*	*Eesliide*	*Sümbol*
10^{1}	deka	da	10^{-1}	detsi	d
10^{2}	hekto	h	10^{-2}	senti	c
10^{3}	kilo	k	10^{-3}	milli	m
10^{6}	mega	M	10^{-6}	mikro	µ
10^{9}	giga	G	10^{-9}	nano	n
10^{12}	tera	T	10^{-12}	piko	p
10^{15}	peta	P	10^{-15}	femto	f
10^{18}	eksa	E	10^{-18}	ato	a
10^{21}	zetta	Z	10^{-21}	zepto	z
10^{24}	jotta	Y	10^{-24}	jokto	y

Massiarvud ja aatomnumbrid

Süsinik-14
$^{14}_{6}C$

Baarium-140
$^{140}_{56}Ba$

plii-210
$^{210}_{82}Pb$

Sümbolid

Kiirguskaitses kasutatakse palju sümboleid. Keemilisi elemente tähistatakse tavaliselt sümbolitega – näiteks tähistab C süsinikku, Ba baariumi ja Pb pliid. Nukliidi massiarvu ja aatomnumbrit väljendatakse üldjuhul vastava üla- ja alaindeksiga. Sageli jäetakse aatomnumber kirjutamata.

Järgnevas tabelis on esitatud kiirguskaitses levinud sümbolid. Kui ühiku sümbolile on lisatud paremale ülaindeks -1, siis tähendab see, et väljendatakse murdosa suurusest või selle määra. Näiteks siivertit tunnis võib kirja panna nii Sv h^{-1} kui ka Sv/h.

Tabel kiirguskaitses kasutatavate sümbolite kohta

Sümbol	*Termin*	*Sümbol*	*Termin*
α	alfaosake	A	massiarv
β	beetaosake	eV	elektronvolt
γ	gammakiir	Bq	bekerell
e	elektron	Gy	grei
p	prooton	Sv	siivert
n	neutron	inimSv	inimsiivert
Z	aatomnumber	t½	poolestusaeg

Ühikud

Kiirguskaitses kasutatavaid ühikuid muudeti suhteliselt hiljuti. Raamatus on kasutusel tänapäevased ühikud, kuid lugeja võib vahel kohata ka vanasid ühikuid: tabelis on näidatud kuidas neid teisendada uuteks ühikuteks.

Kiirguskaitses kasutatavate vanade ja uute ühikute suhe

Suurus	*Vana ühik*	*Sümbol*	*Uus ühik*	*Sümbol*	*Suhe*
Aktiivsus	curie	Ci	bekerell	Bq	1 Ci = $3,7 \times 10^{10}$ Bq
Neeldumisdoos	rad	rad	grei	Gy	1 rad = 0,01 Gy
Ekvivalentdoos[a]	remm	rem	siivert	Sv	1 rem = 0,01 Sv

[a] varem kasutati terminit doosiekvivalent

KIIRGUS, INIMESED JA KESKKOND

